



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CARTAGENA**

**ESCUELA UNIVERSIDAD
DE INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL**

**INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS,
ESPECIALIDAD HIDROLOGÍA**

Proyecto Fin de Carrera

**VALIDACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE
SENSIBILIDAD EN EL ESTUDIO DE AVENIDAS
DE CUENCAS MEDITERRÁNEAS**

GEMMA ELENA MOLINA LÓPEZ

Dirigido por:

D. LUÍS G. CASTILLO ELTSIDIÉ
Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

D. MANUEL ALCARÁZ APARICIO
Ingeniero de Minas

Cartagena, septiembre 2009

Índice

0. Resumen.....	1
1. Introducción.....	28
2. Objetivos.....	29
3. Obtención de las subcuencas de estudio mediante Sistemas de Información Geográfica.....	30
3.1. Generación del Modelo Digital de Elevación.....	35
3.1.1. Definición.....	35
3.1.2. Fuentes de información.....	37
3.1.3. Reconstrucción del contorno de costa.....	37
3.1.4. Modificaciones.....	39
3.1.5. Conclusiones.....	41
3.2. Obtención de las características geomorfológicas de la cuenca mediante HEC-GeoHMS.....	42
3.2.1. Descripción.....	42
3.2.2. Algoritmo de cálculo.....	42
3.2.3. Preprocesado del terreno.....	43
3.2.3.1. Data Management (Gestión de datos).....	46
3.2.3.2. Fill Sinks (Llenado de huecos).....	46
3.2.3.3. Flow Direction (Dirección de Flujo).....	47
3.2.3.4. Flow Accumulation (Acumulación de Flujo).....	47
3.2.3.5. Stream Definition (Definición del Cauce).....	47
3.2.3.6. Verificación de la delineación de cauces.....	49
3.2.3.7. Reacondicionamiento del terreno.....	50
3.2.3.8. Modificación de los datos de partida.....	41
3.2.3.9. Finalización del preprocesado de la cuenca.....	41
3.2.4. Extracción de la cuenca de estudio.....	42
3.2.5. Procesado de cuenca.....	42
3.2.6. Características de Cauces y Subcuencas.....	43
3.2.7. Estimación de los parámetros hidrológicos.....	55
3.2.7.1. Tiempo de concentración.....	55
3.2.7.2. Número de Curva.....	57
3.2.8. Exportar datos a HEC-HMS.....	57
4. Cálculo de la precipitación máxima diaria.....	60
4.1. Análisis de los datos de las estaciones pluviométricas.....	61
4.2. Ajuste según la función de Gumbel.....	64
4.3. Máximas lluvias en la España Peninsular.....	66
4.4. Precipitación máxima diaria para cada subcuenca.....	72
4.4.1. Método de los Polígonos de Thiessen.....	72
5. Obtención de los caudales punta mediante HEC-HMS.....	73

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas
mediterráneas

7.1. Resultados obtenidos con HEC-HMS.....	151
7.1.1. Análisis del tamaño de las subcuencas.....	151
7.1.2. Análisis entre los métodos de propagación.....	162
8. Conclusiones.....	174
9. Bibliografía.....	177

0. Resumen

En este proyecto fin de carrera se realiza en primer lugar un análisis detallado y cálculo de la validación de los datos pluviométricos. En segundo lugar, un análisis de sensibilidad tanto del tamaño de la cuenca, como del método empleado (SCS y Onda Cinemática) en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas, para lo que se ha utilizado el programa semidistribuido HEC-HMS y el programa de información geográfica HEC-GeoHMS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

La zona de estudio está ubicada en la Rambla del Albujón, dentro de la Cuenca Hidrográfica del Río Segura. Se trata de una cuenca con una gran extensión y poca pendiente.

Partiendo de un Modelo Digital de elevación de la zona previamente elaborado, y con el programa HEC-GeoHMS se ha obtenido una capa con la delimitación de todas las subcuencas existentes en la cuenca. El resultado obtenido mediante su algoritmo de cálculo se puede apreciar en la siguiente figura, que representa el modelo original o “primitivo” sobre el que se va a trabajar.

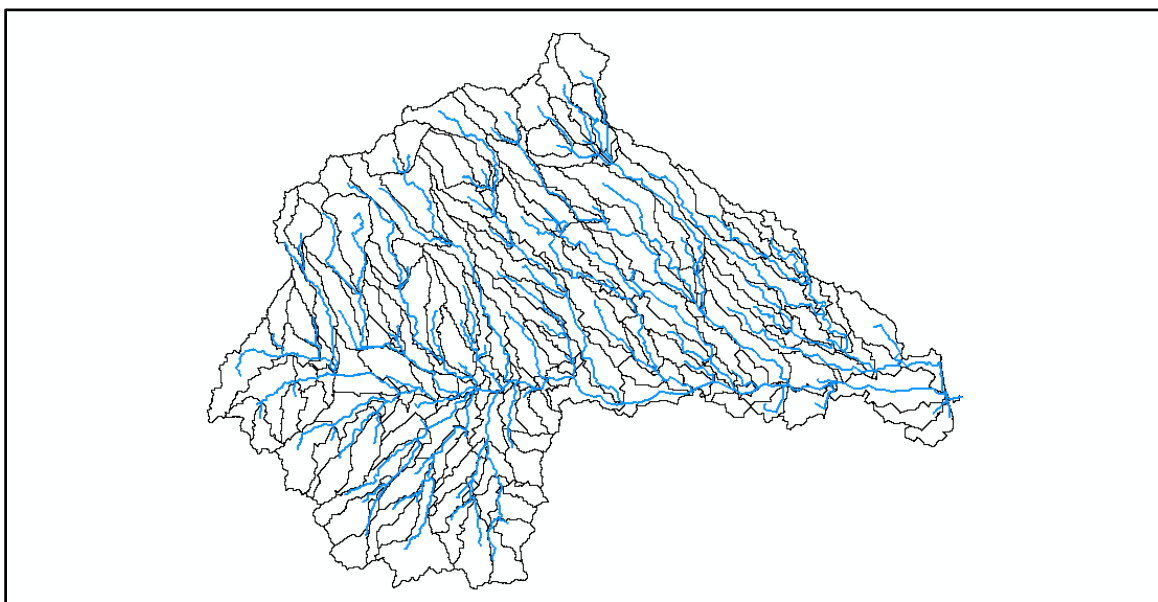
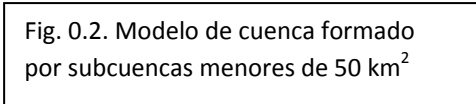


Fig. 0.1. Modelo de cuenca “primitivo”

A partir de la capa anterior y mediante agregación de subcuencas, se han obtenido dos modelos de cuenca con los distintos tamaños que se considerarán para el estudio de sensibilidad. Se compararán los resultados obtenidos a partir de un modelo formado por subcuencas mayores de 100 km² y un modelo con subcuencas menores de 50 km², representados en las siguientes figuras:



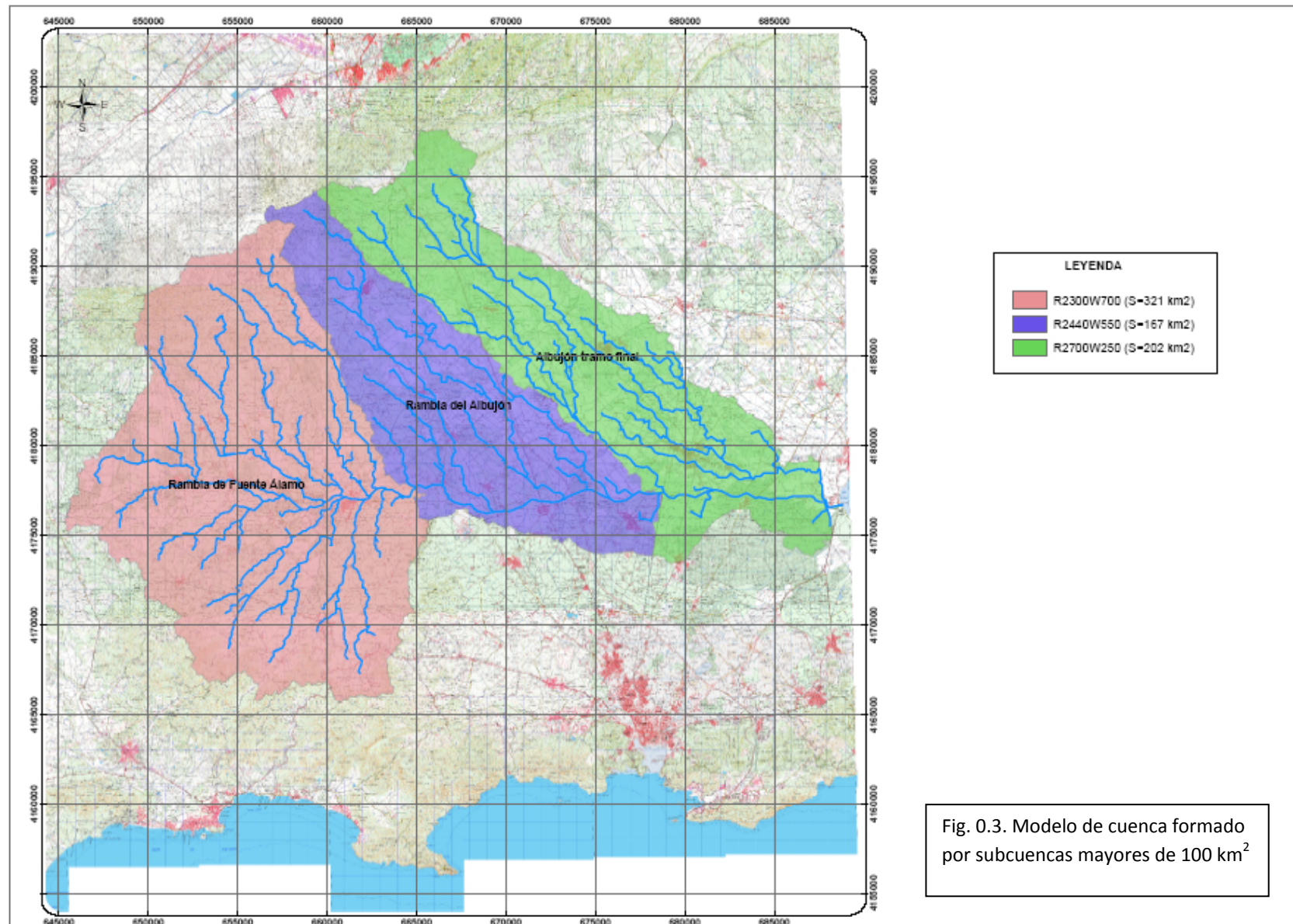


Fig. 0.3. Modelo de cuenca formado por subcuencas mayores de 100 km²

Una vez obtenidos los modelos de cuenca, con el programa HEC-GeoHMS se obtienen las características físicas de cada subcuenca y de los cauces.

Se ha de advertir que el programa Geo-HMS genera automáticamente los nombres de las subcuencas y tramos definidos en el modelo. Para ubicar más fácilmente las subcuencas, su nombre se ha cambiado por el real o por un nombre característico de la zona. En algunos documentos como los generados por HEC-HMS se emplean los creados automáticamente por el Geo-HMS. Con el fin de poder establecer la relación de una nomenclatura con otra, se presenta la siguiente tabla.

Subcuencas_50	HMS	Subcuencas_100	HMS
La Pinilla	R2660W2660	Rambla de Fuente Álamo	R2300W700
Loma del Mojón	R2180W1180	Rambla del Albuñón	R2440W550
Los Gálvez	R2660W860	Albuñón tramo final	R2700W250
Cuevas de Rylo	R2580W2200		
El Ventorrillo	R2190W990		
La Capellanía	R2630W2630		
Rambla de la Azohía	R2600W2600		
Rambla de Fuente Álamo	R2310W1660		
Rincón de Lobera	R2300W2300		
Rambla de la Murta	R1270W700		
Rambla del Fraile	R2770W1630		
Valladolises	R2480W550		
Albuñón	R2110W1160		
Los Martínez del Puerto	R1580W520		
Pozo Estrecho	R2440W1050		
Las Moreras	R2080W250		
Roldán	R1930W1130		
Albuñón tramo final	R2700W1780		

Tabla 0.0. Nomenclatura de las subcuencas de 50 km² y mayores de 100 km².

Los resultados obtenidos de las principales características físicas de las subcuencas son los siguientes:

Subcuencas mayores de 100 km ²	Long. máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
Albuñón tramo final	44,79	201,70	590	0
Rambla de Fuente Álamo	29,69	321,18	992	101
Rambla del Albuñón	40,26	167,90	624	41,90

Tabla 0.1. Características físicas de las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas menores de 50 km ²	Long. máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
La Pinilla	11,88	27,28	187,91	148,05
Loma del Mojón	14,13	34,22	306,75	169,98
Los Gálvez	22,03	30,69	232,94	122,84
Cuevas de Ryllo	16,90	37,94	173,08	139,01
El Ventorrillo	22,70	36,06	233,28	126,36
La Capellanía	16,50	52,00	195,09	124,28
Rambla de la Azohía	15,09	39,78	162,00	116,98
Rambla de Fuente Álamo	13,66	15,61	168,38	110,94
Rincón de Lobera	10,67	16,00	134,32	101,00
Rambla de la Murta	22,68	31,60	254,52	113,13
Rambla del Fraile	18,32	28,46	151,15	76,94
Valladolises	29,64	43,37	223,00	76,94
Albujón	25,23	48,29	138,51	56,49
Los Martínez del Puerto	25,49	42,18	195,02	75,00
Pozo Estrecho	27,24	47,79	118,15	41,90
Las Moreras	32,27	52,10	136,84	38,43
Roldán	25,14	52,22	105,45	31,03
Albujón tramo final	23,44	55,21	34,02	0,00

Tabla 0.2. Características físicas de las subcuencas menores de 50 km²

Las características de los cauces se pueden apreciar en la siguiente tabla donde se indica la longitud del tramo, su pendiente, las características de su sección y el coeficiente de Manning adoptado.

Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coeficiente rugosidad
R2770	4056,9	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2700	1369,8	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2640	148,3	0,0021	Ocho puntos	0.035
R2610	4292,1	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2530	6991,8	0,0031	Ocho puntos	0.035
R2510	1553,3	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2460	215,6	0,0161	Ocho puntos	0.035
R2440	1701,7	0,0015	Ocho puntos	0.035
R2420	2949,1	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2410	283,5	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2400	1446,8	0,0047	Ocho puntos	0.035
R2390	1623,7	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2240	1769,7	0,0050	Ocho puntos	0.035

Tabla 0.3. Características físicas de los cauces para las subcuencas mayores de 100 km²

Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coefficiente de rugosidad
R2770	4056,9	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2700	1369,8	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2640	148,3	0,0021	Ocho puntos	0.035
R2670	1570,1	0,0081	Ocho puntos	0.035
R2610	4292,1	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2620	1644,9	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2590	1192,8	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2580	1288,2	0,0019	Ocho puntos	0.035
R2570	462,3	0,0071	Ocho puntos	0.035
R2550	296,9	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2540	343,0	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2530	6991,8	0,0031	Ocho puntos	0.035
R2510	1553,3	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2500	346,1	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2490	1028,4	0,0041	Ocho puntos	0.035
R2460	215,6	0,0161	Ocho puntos	0.035
R2440	1701,7	0,0015	Ocho puntos	0.035
R2420	2949,1	0,004	Ocho puntos	0.035
R2410	283,5	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2400	1446,8	0,0047	Ocho puntos	0.035
R2390	1623,7	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2350	598,2	0,0051	Ocho puntos	0.035
R2330	1245,6	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2310	629,3	0,0035	Ocho puntos	0.035
R2300	797,6	0,0051	Ocho puntos	0.035
R2240	1769,7	0,005	Ocho puntos	0.035
R2200	4585,4	0,0048	Ocho puntos	0.035
R2130	4869,6	0,0033	Ocho puntos	0.035
R2120	2053,2	0,0024	Ocho puntos	0.035
R2080	7557,8	0,0048	Ocho puntos	0.035
R2050	2384,5	0,0025	Ocho puntos	0.035

Tabla 0.4. Características físicas de los cauces para las subcuencas menores de 50 km²

Sobre las secciones que definen el cauce cabe decir que han sido obtenidas una a una a partir del MDE, y por medio del programa de información geográfica ArcGis. Para todos los tramos se ha calculado una sección media de ocho puntos.

El siguiente paso sería obtener los parámetros hidrológicos necesarios para el cálculo de los caudales. En este caso, dichos parámetros son el tiempo de concentración y el Número de Curva de cada subcuenca.

				TÉMEZ	
Subcuencas	Long. Máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Pendiente	Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
Rambla de Fuente Álamo	29,69	321,18	0,030	7,68	138,36
Rambla del Albuñón	40,26	167,9	0,014	11,19	201,55
Albuñón tramo final	44,79	201,7	0,013	12,31	221,65

Tabla 0.5. Tiempo de concentración y tiempo lag para las subcuencas mayores de 100 km²

					TÉMEZ	
Subcuencas	Cota superior (m)	Cota inferior (m)	Long. máxima de flujo (km)	Pendiente	Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
La Pinilla	187,91	148,05	11,888	0,012	4,56	95,80
Loma del Mojón	306,75	169,98	14,132	0,058	3,85	80,99
Los Gálvez	232,94	122,84	22,034	0,043	5,72	120,15
Cuevas de Ryllo	173,08	139,01	16,909	0,006	6,80	142,84
El Ventorrillo	233,28	126,36	22,702	0,022	6,64	139,60
La Capellanía	195,09	124,28	16,507	0,033	4,83	101,44
Rambla de la Azohía	162,00	116,98	15,099	0,023	4,83	101,53
Rambla de Fuente Álamo	168,38	110,94	13,660	0,017	4,74	99,65
Rincón de Lobera	134,32	101,00	10,673	0,015	4,02	84,60
Rambla de la Murta	254,52	113,13	22,689	0,030	6,26	131,55
Rambla del Fraile	151,15	76,94	18,326	0,012	6,33	133,11
Valladolises	223,00	76,94	29,649	0,018	8,45	177,65
Albuñón	138,51	56,49	25,231	0,009	8,53	179,26
Los Martínez del Puerto	195,02	75,00	25,492	0,020	7,39	155,24
Pozo Estrecho	118,15	41,90	27,241	0,010	8,86	186,25
Las Moreras	136,84	38,43	32,273	0,017	9,12	191,54
Roldán	105,45	31,03	25,144	0,008	8,70	182,84
Albuñón tramo final	34,02	0,00	23,444	0,005	9,02	189,56

Tabla 0.6. Tiempo de concentración y tiempo lag para las subcuencas menores de 50 km²

Para la obtención del Número de Curva se ha utilizado el método propuesto por el CEDEX. Este método asigna el valor de un número primo distinto a cada una de las características del terreno definidas en las tres capas de información utilizadas (pendientes, tipos de suelo y usos de suelo). Multiplicando las tres capas de información se obtiene una capa (que se llamará Número de Curva) como producto de ellas, que contiene la información característica del terreno combinada de las tres, reflejada en un número que será el resultado del producto de los tres números primos relativos a cada una de las capas. Posteriormente se reclasifica para obtener los Números de Curva.

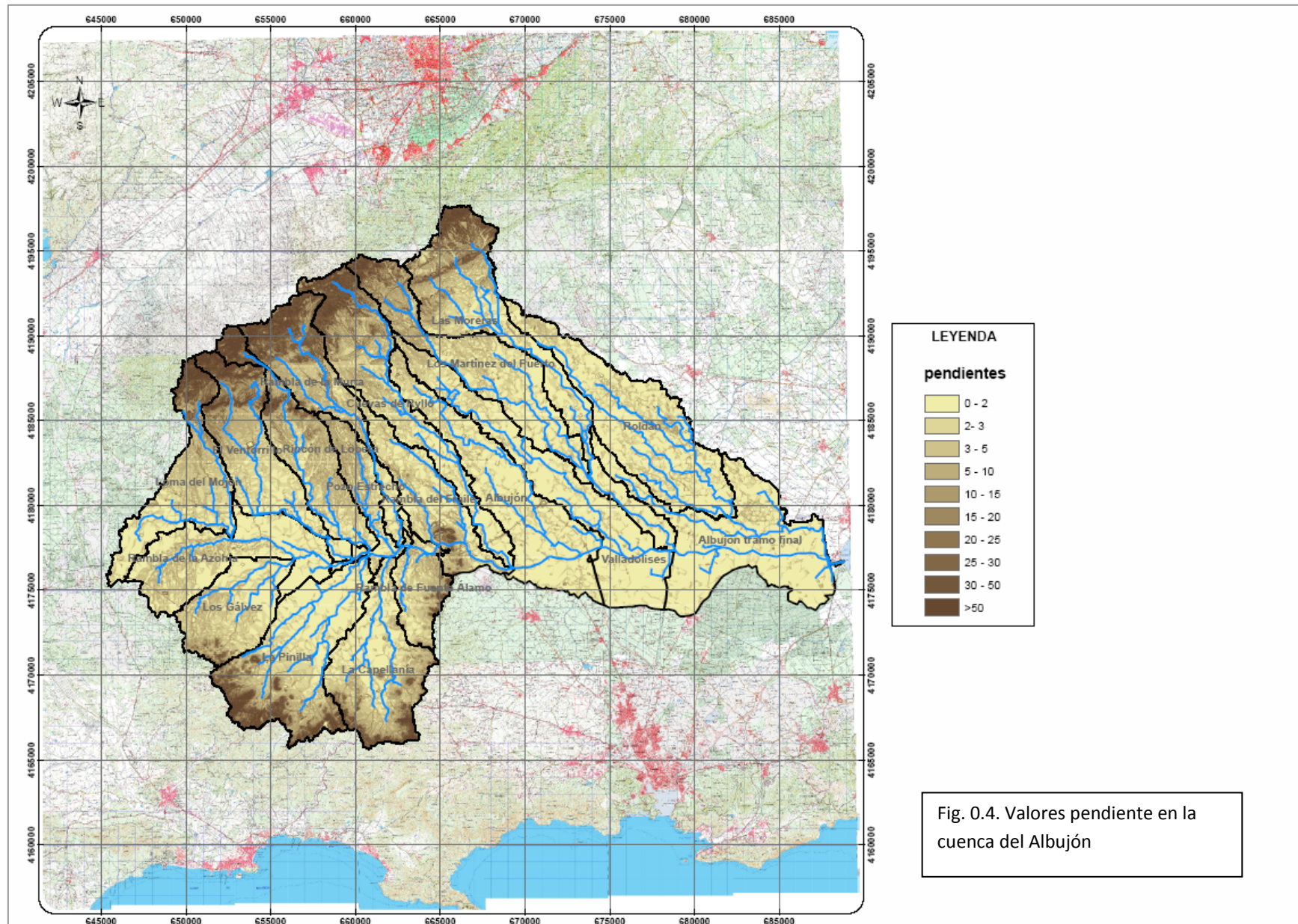
La reclasificación es sencilla de hacer ya que a cada valor numérico obtenido en la capa Número de Curva sólo podría corresponderle una única combinación de los 3 números primos asignadas a las tres variables (pendientes, usos y tipo de terreno), y que condiciona el valor del Número de Curva, así cada número producto de los tres primos tendrá asociado un único Número de Curva.

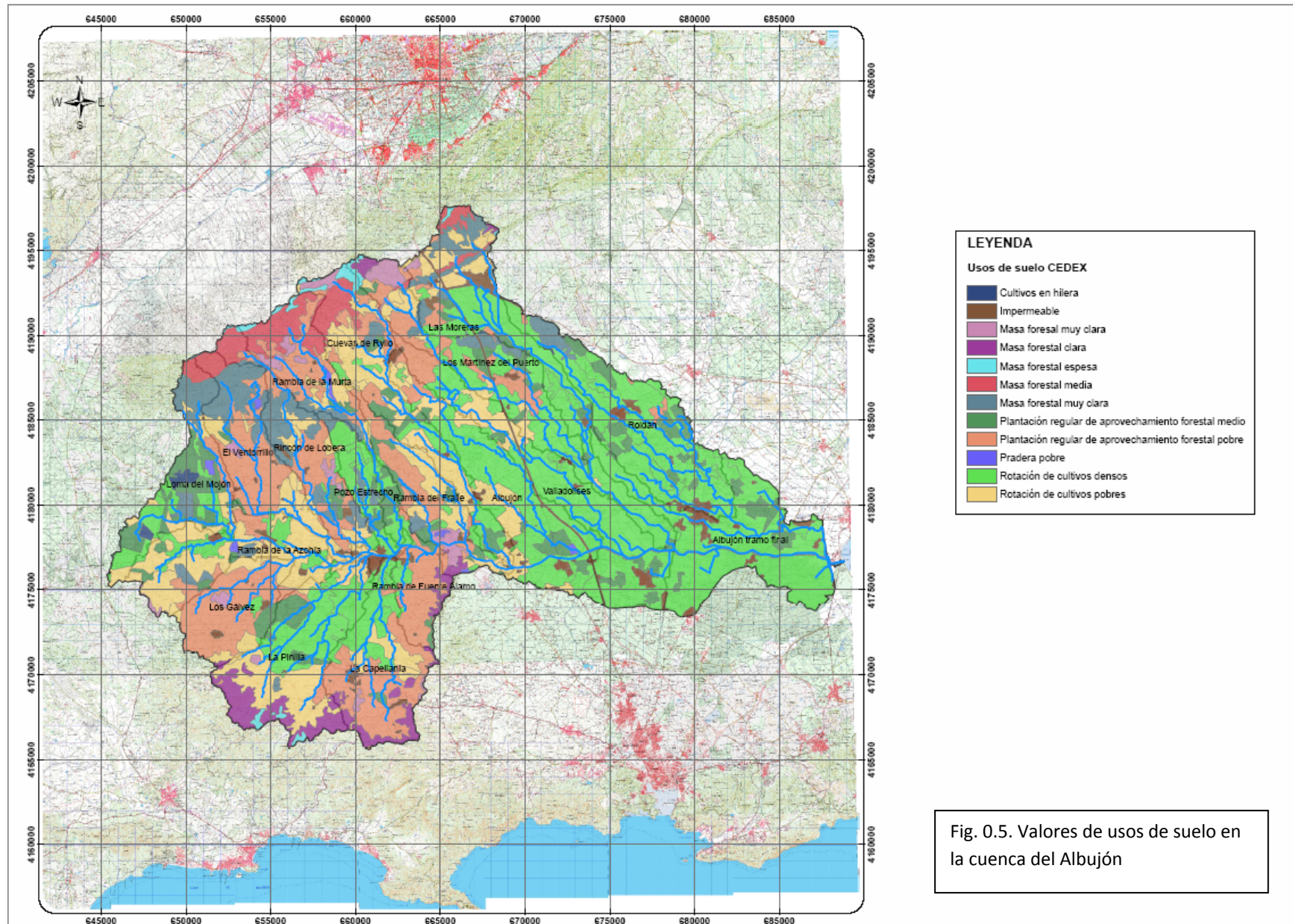
Subcuencas mayores de 100 km ²	CN
Rambla de Fuente Álamo	76
Rambla del Albuñón	77
Albuñón tramo final	76

Tabla 0.7. Números de curva para las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas menores de 50 km ²	CN
La Pinilla	76
Loma del Mojón	73
Los Gálvez	77
Cuevas de Ryllo	80
El Ventorrillo	75
La Capellanía	78
Rambla de la Azohía	76
Rambla de Fuente Álamo	81
Rincón de Lobera	73
Rambla de la Murta	74
Rambla del Fraile	77
Valladolises	77
Albuñón	78
Pozo Estrecho	77
Los Martínez del Puerto	78
Las Moreras	79
Roldán	77
Albuñón tramo final	76

Tabla 0.8. Números de curva para las subcuencas menores de 50 km²





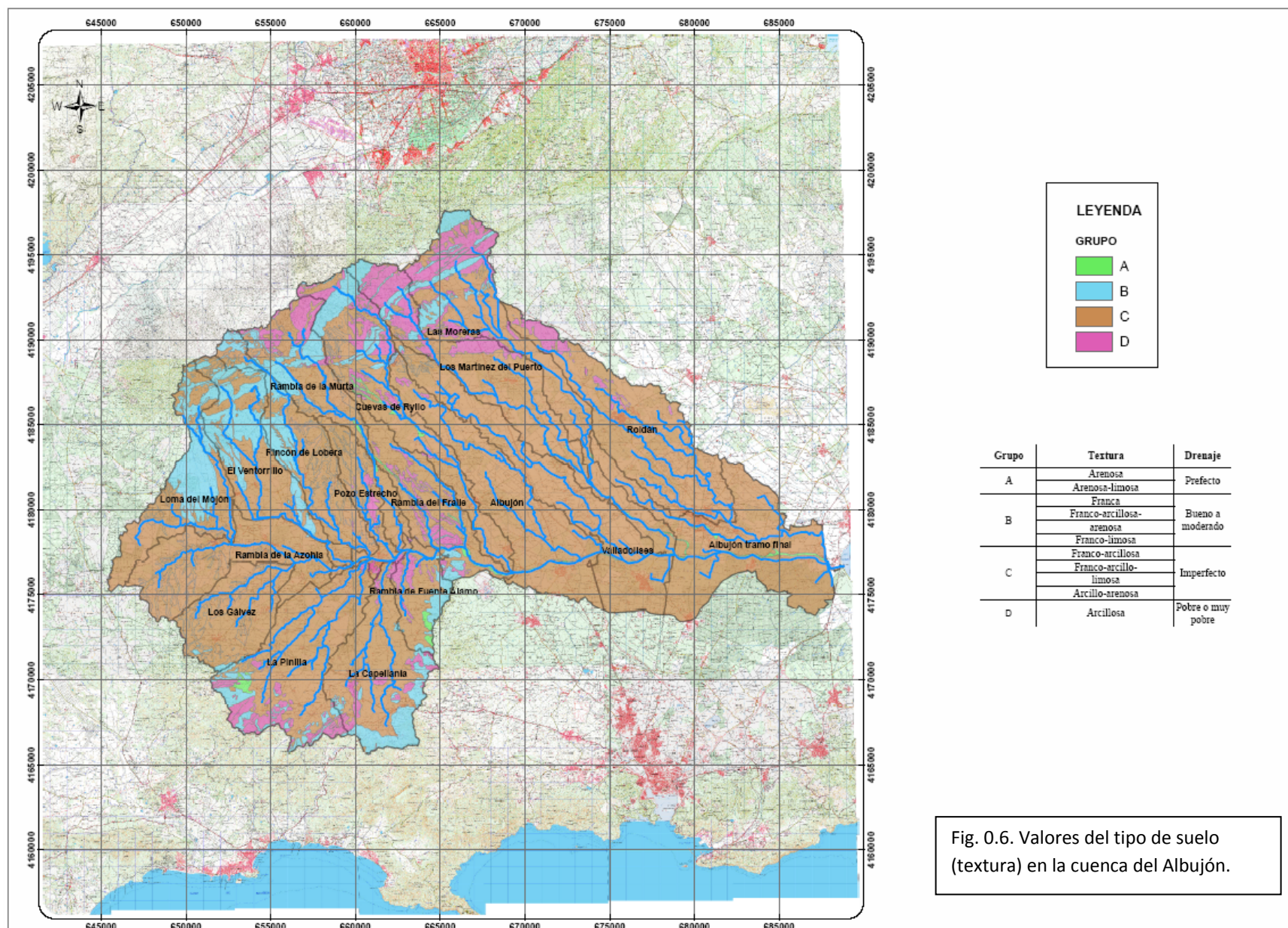
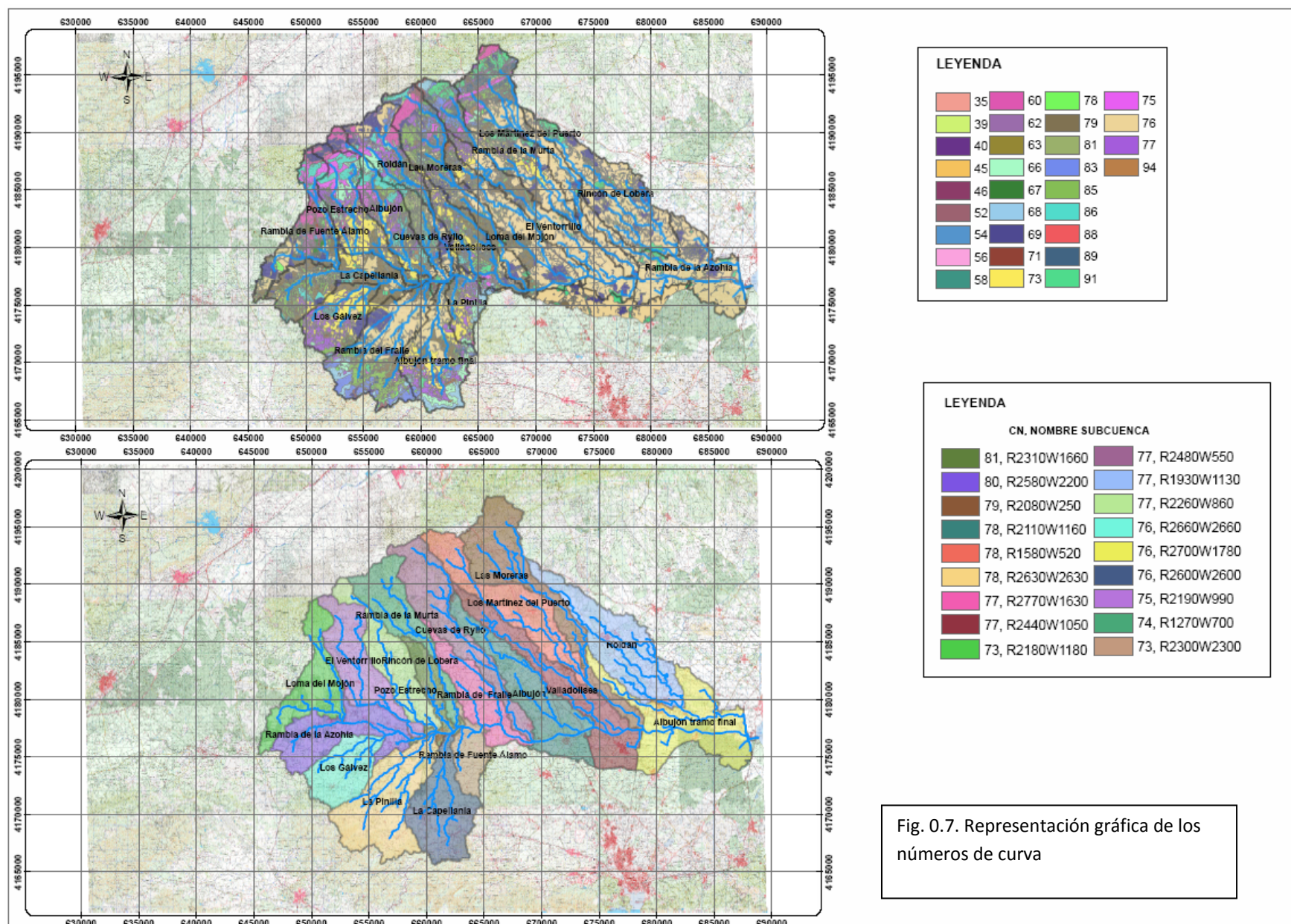


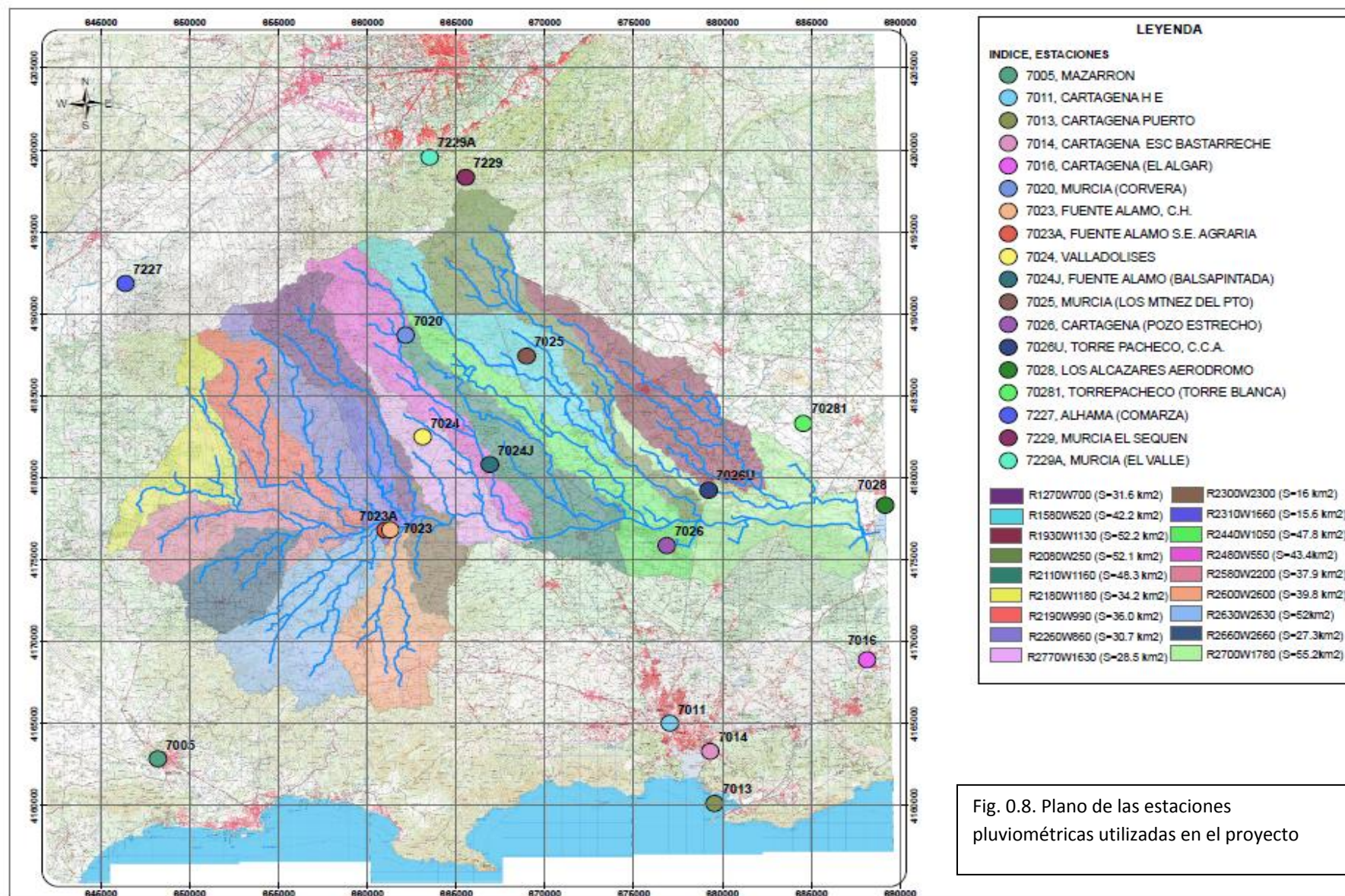
Fig. 0.6. Valores del tipo de suelo (textura) en la cuenca del Albuñón.

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas



Los datos pluviométricos que han sido utilizados son los de precipitaciones máximas diarias en 24 horas correspondientes a las estaciones pluviométricas más cercanas a la cuenca de estudio (ver lámina siguiente). Datos que fueron facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet).

Para su validación se utilizó el Método de las Dobles Masas, con el fin de analizar la consistencia de los datos y verificar que las condiciones de medida de los datos no han variado a lo largo del tiempo ni del espacio.



Una vez obtenidos los datos de precipitaciones máximas diarias corregidos, se les aplica un ajuste estadístico por medio de una función de distribución. En este caso se ha utilizado la función de Gumbel para obtener la precipitación total diaria correspondiente a cada periodo de retorno.

Los valores obtenidos mediante la función de Gumbel han sido comparados con los obtenidos mediante el método de las Máximas Lluvias en la España Peninsular, y se ha elegido aquellos datos con mayor valor de la precipitación. En este caso se observó que los valores obtenidos mediante la función de distribución de Gumbel son superiores.

Los valores obtenidos con este ajuste para cada una de las subcuencas se muestran a continuación:

Estaciones	Precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno (mm)					
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500
Murcia (El Valle)	69,82	85,67	120,55	135,29	149,98	169,36
Murcia El Sequen	65,91	85,20	127,66	145,60	163,49	187,08
Murcia (Corvera)	73,74	91,08	129,23	145,37	161,44	182,64
Murcia (Los Martínez del Puerto)	79,30	98,73	141,49	159,57	177,58	201,34
Alhama (Comarza)	82,72	103,37	148,84	168,05	187,20	212,47
Mazarrón	111,11	140,66	205,69	233,19	260,58	296,72
Fuente Álamo S.E. Agraria	70,52	86,96	123,14	138,43	153,67	173,78
Fuente Álamo C.H.	78,16	93,13	126,05	139,97	153,84	172,14
Fuente Álamo Balsapintada	84,49	109,51	164,58	187,86	211,05	241,66
Valladolides	79,62	100,64	146,91	166,47	185,96	211,67
Cartagena (Pozo Estrecho)	81,74	100,76	142,62	160,32	177,95	201,22
Torre-Pacheco C.C.A.	80,00	100,78	146,52	165,86	185,12	210,54
Torre-Pacheco (Torreblanca)	80,21	100,94	146,57	165,86	185,08	210,44
Los Alcázares Aeródromo	106,16	145,28	231,38	267,78	304,05	351,89
Cartagena H.E.	76,88	96,41	139,38	157,55	175,65	199,53
Cartagena Esc. Bastarreche	83,41	105,48	154,06	174,60	195,06	222,06
Cartagena (El Algar)	92,31	111,88	154,94	173,14	191,28	215,21
Cartagena Puerto	82,81	105,24	154,62	175,50	196,30	223,74

Tabla 0.9. Resultados del ajuste mediante la función de distribución de Gumbel

Para obtener la precipitación máxima diaria correspondiente a cada subcuenca se ha utilizado el método de los Polígonos de Thiessen. Este método trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos mediante este método son:

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen (mm)						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Rambla de Fuente Álamo	79,11	98,45	141,00	158,99	176,91	200,55	211,27
Rambla del Albuñón	80,13	101,20	147,57	167,17	186,70	212,47	232,05
Albuñón tramo final	80,10	101,49	148,58	168,49	188,32	214,49	234,87

Tabla 0.11. Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen para las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen (mm)						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
La Pinilla	79,45	98,78	141,32	159,30	177,22	200,86	218,73
Loma del Mojón	79,79	99,37	142,48	160,70	178,86	202,82	220,94
Los Gálvez	76,05	94,88	136,33	153,86	171,32	194,35	211,77
Cuevas de Ryllo	75,33	93,33	132,93	149,67	166,35	188,36	205,00
El Ventorrillo	75,86	94,29	134,86	152,01	169,10	191,64	144,73
La Capellanía	91,97	118,26	176,13	200,59	224,96	257,12	281,42
Rambla de la Azohía	74,66	90,30	124,73	139,28	153,78	172,91	187,40
Rambla de Fuente Álamo	77,46	96,24	137,57	155,04	172,45	195,42	212,78
Rincón de Lobera	78,17	93,21	126,31	140,30	154,24	172,64	186,56
Rambla de la Murta	75,13	92,96	132,20	148,78	165,31	187,11	203,61
Rambla del Fraile	81,47	103,72	152,68	173,38	194,00	221,21	241,77
Valladolises	76,76	96,18	138,91	156,98	174,98	198,72	216,69
Albuñón	82,22	104,93	154,89	176,01	197,06	224,83	245,82
Los Martínez del Puerto	77,31	96,09	137,41	154,88	172,29	195,25	212,45
Pozo Estrecho	80,70	101,07	145,89	164,84	183,72	208,62	226,76
Las Moreras	74,10	93,37	135,77	153,69	171,55	195,11	211,23
Roldán	79,77	100,08	144,78	163,67	182,50	207,34	226,13
Albuñón tramo final	89,17	116,20	175,67	200,82	225,87	258,92	283,93

Tabla 0.12. Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen para las subcuencas menores de 50 km²

En el caso de la precipitación de cálculo, para este estudio se ha considerado oportuno utilizar el patrón del proyecto LINDE modificado. Con esto se consigue la distribución temporal de la precipitación. Se concentra el 80% de la precipitación en las 6 horas centrales, manteniendo la distribución original del patrón y el 20% restante se ha distribuido en las 9 horas anteriores y posteriores. El patrón queda de la siguiente forma:

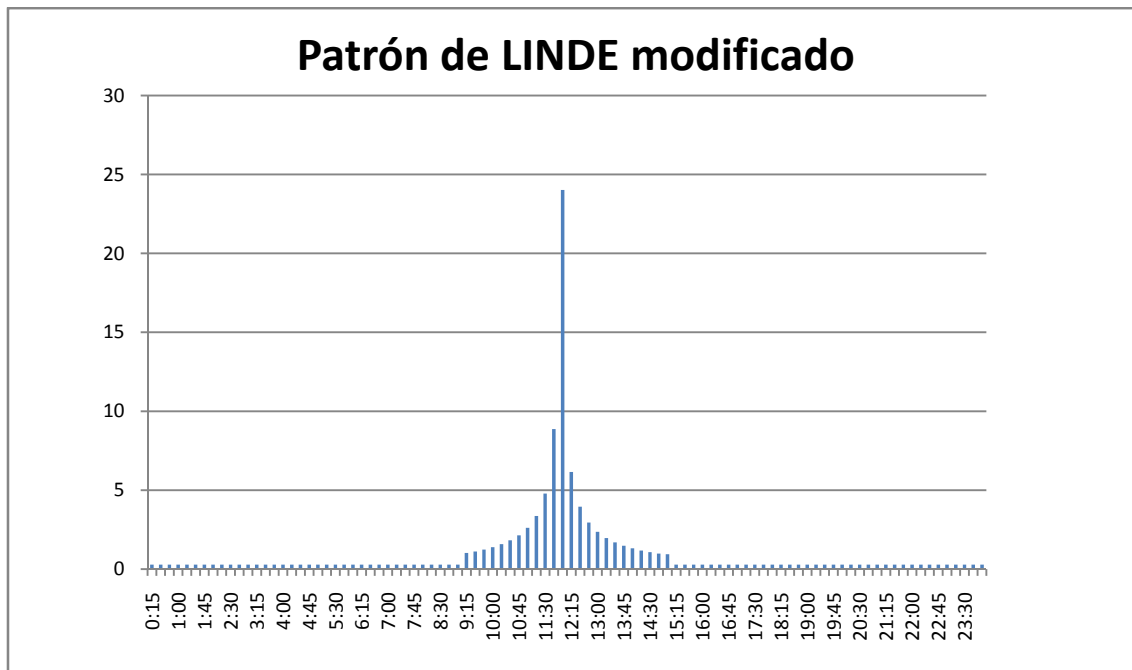


Fig.0.9. Patrón de precipitación de LINDE modificado

Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios para la simulación del modelo de cuenca en HEC-HMS, se procede a introducir los datos en el programa y observar los resultados.

Los métodos de cálculo elegidos en este estudio son:

- Método del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS) para las pérdidas por infiltración.
- Hidrograma Unitario del SCS para el proceso de transformación lluvia-caudal
- Onda Cinemática para el proceso de transformación lluvia-caudal, como método alternativo al método del SCS.
- Método de Muskingum-Cunge para los tránsitos en cauce.

En primer lugar se realizará la transformación lluvia-caudal mediante el método del SCS. Los caudales de salida de la cuenca completa para los distintos tamaños de cuenca y para el periodo de retorno de 1000 años se pueden observar en la siguiente figura.

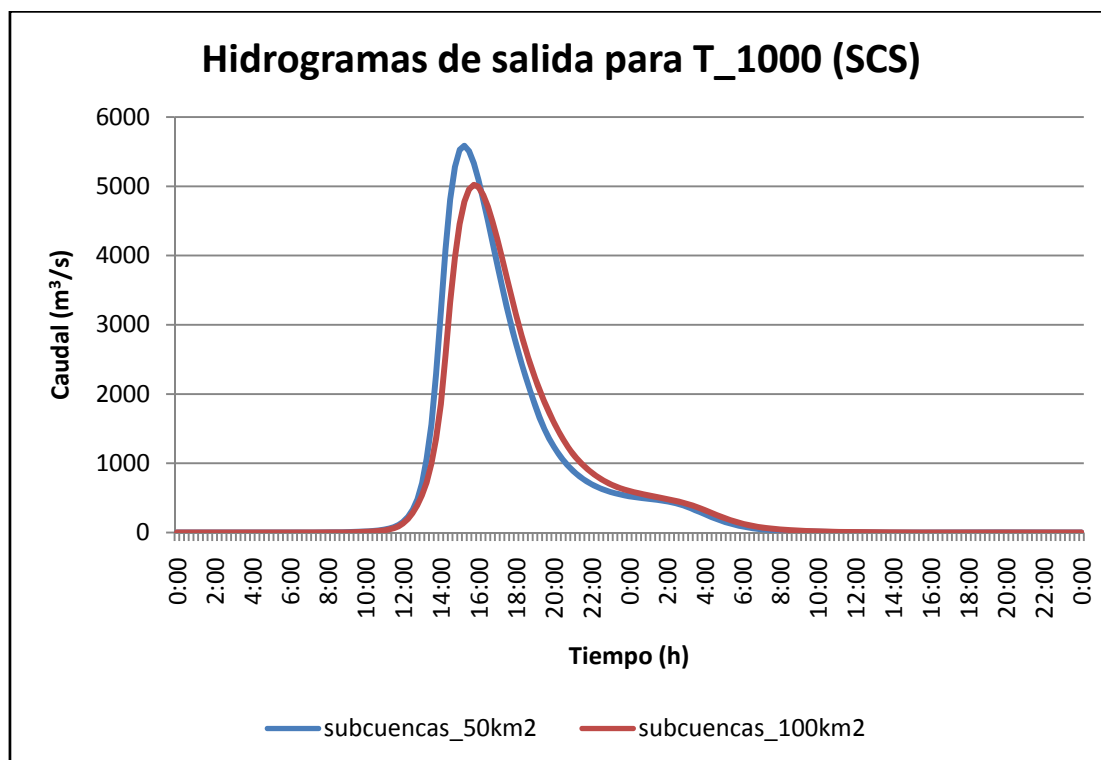


Fig. 0.10. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 1000 años

Este hidrograma indica que los caudales para las subcuencas menores de 50 km² son ligeramente superiores a los caudales resultantes para las subcuencas con más de 100 km². Con esto se aprecia fácilmente que a menor tamaño de cuenca, más exactos serán los resultados.

Los datos obtenidos por el método SCS se han contrastado con los caudales calculados mediante el método de la Instrucción. Los resultados para la cuenca completa son:

Subcuencas mayores de 100 km2							
	T_5	T_10	T_50	T_100	T_200	T_500	T_1000
Instrucción	804,03	1277,80	2513,69	3092,48	3692,90	4513,59	5043,26
SCS	907,10	1414,00	2663,40	3224,00	3788,90	4552,6	5019,2
Diferencia en %	-11,36%	-9,63%	-5,62%	-4,07%	-2,53%	-0,85%	0,48%

Subcuencas menores de 50 km2							
	T_5	T_10	T_50	T_100	T_200	T_500	T_1000
Instrucción	1009,84	1574,68	3022,28	3691,66	4381,95	5320,08	5915,31
SCS	985,00	1553,50	2947,50	3340,90	4193,90	5051,90	5584,5
Diferencia en %	2,46%	1,36%	2,47%	9,5%	4,29%	5,04%	5,59%

Tabla 0.13. Comparación de caudales en m³/s obtenidos con HEC-HMS (LINDE modificado) y la Instrucción con un coeficiente corrector de P₀ de 1,5

La diferencia entre ambos métodos está referida al método de la Instrucción. Con respecto a la diferencia de ambos métodos para las subcuencas mayores de 100 km² se observa que, para el método de la Instrucción los caudales punta son menores con respecto al método del SCS, excepto para el periodo de retorno de 1000 años. Por el contrario, para las subcuencas menores de 50 km² los caudales punta mayores se obtienen con el método de la Instrucción

Para poder analizar con mayor exactitud las diferencias entre los hidrogramas para cada periodo de retorno calculados con el método del SCS, se muestran unas tablas donde se compara el caudal pico de ambos hidrogramas, así como los volúmenes y el tiempo de retardo entre un hidrograma y otro. La diferencia está en función de las subcuencas menores a 50 km².

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	985	1553,5	2947,5	3340,9	4193,9	5051,9	5584,5
> 100km ²	907,1	1414	2663,4	3224	3788,2	4552,6	5019,2
Diferencia	77,9	139,5	284,1	116,9	405,7	499,3	565,3
%	7,91	8,95	9,63	3,49	9,67	9,88	10,12

Tabla 0.14. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Volumen del hidrograma (mm)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	29,13	44,2	81,16	92,13	114,32	136,92	151,26
> 100km ²	28,55	43,48	80,04	96,49	113,27	135,84	150,27
Diferencia	0,58	0,72	1,12	-4,36	1,05	1,08	0,99
%	1,99	1,62	1,37	-4,73	0,91	0,79	0,65

Tabla 0.15. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	16:15	16:00	15:30	15:30	15:30	15:15	15:15
> 100km ²	16:45	16:30	16:00	16:00	16:00	15:45	15:45
Diferencia	30	30	30	30	30	30	30

Tabla 0.16. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Observando las tablas se aprecia que, para el caso del caudal pico, el correspondiente al hidrograma para las subcuencas menores de 50 km² es superior al del hidrograma para las subcuencas mayores. Para el periodo de retorno de 100 años esta diferencia es muy pequeña, del 3,49%, sin embargo, va aumentando conforme lo hace el periodo de retorno, llegando hasta un 10,12% para el periodo de retorno de 1000 años.

Para el volumen total de los hidrogramas, las subcuencas menores de 50 km² contienen un volumen ligeramente superior al de las subcuencas de mayor tamaño, excepto para el periodo de retorno de 100 años, donde el volumen total que recogen las subcuencas mayores supera en un 4,73% al volumen de las subcuencas más pequeñas.

En el caso del tiempo pico de cada hidrograma, se aprecia claramente, tanto en la tabla como en los gráficos, el retraso de unos 30 minutos del hidrograma que presentan las subcuencas más grandes con respecto al tiempo pico del hidrograma correspondiente a las subcuencas menores de 50 km², para todos los periodos de retorno.

A continuación se muestran los hidrogramas correspondientes a la transformación lluvia-caudal mediante el método de la Onda Cinemática comparando los distintos tamaños de subcuencas y para el periodo de retorno de 1000 años.

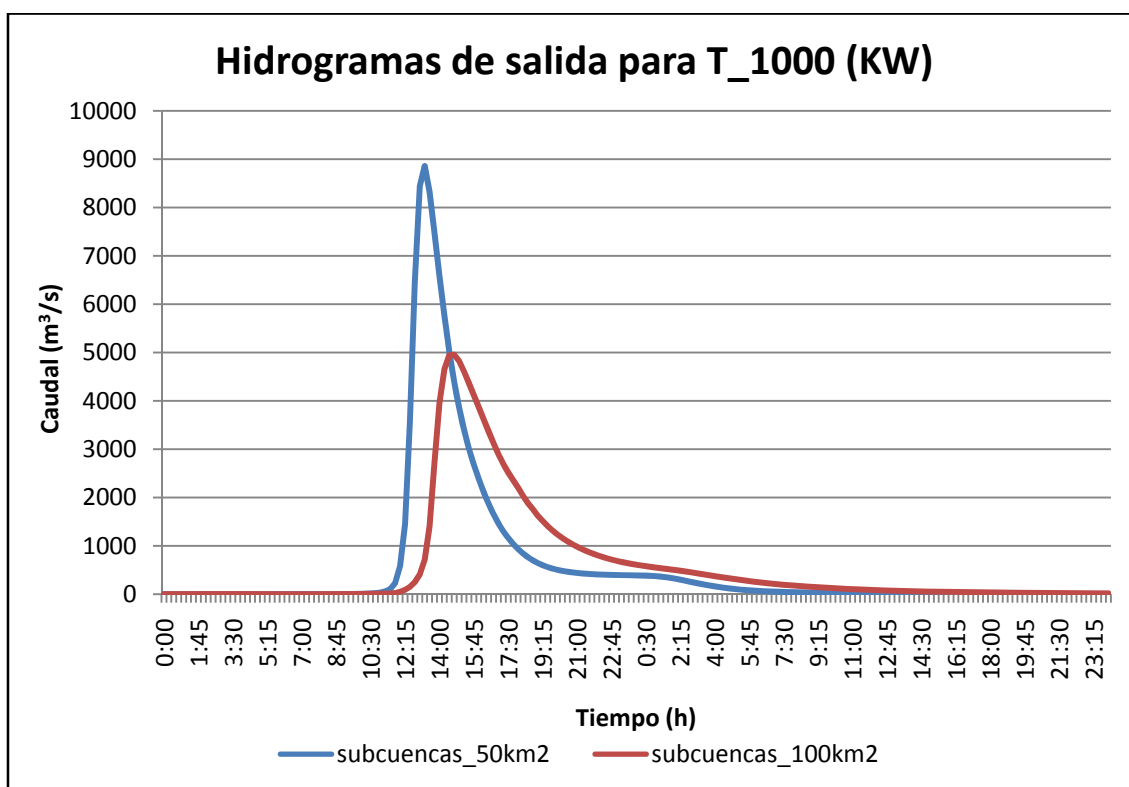


Fig. 0.11. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 1000 años

En este método se observa claramente que los caudales a la salida de la cuenca completa varían mucho en el caso de realizar el proceso con distintos tamaños de cuenca.

Al igual que para el método anterior, para tener una idea más clara de las diferencias entre los resultados obtenidos según los tamaños de las subcuencas, se muestran las siguientes tablas comparativas.

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	853,2	1544,8	3663	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3
> 100km ²	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,6
Diferencia	430,5	739,5	1699,5	1763,3	2699,4	3301,7	3902,7
%	50,47	47,87	46,39	40,34	45,23	43,50	44,06

Tabla 0.17. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Volumen del hidrograma (mm)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	27,91	42,36	77,7	88,59	109,6	131,79	146,73
> 100km ²	27,04	41,35	76,54	92,62	108,96	131,22	144,9
Diferencia	0,87	1,01	1,16	-4,03	0,64	0,57	1,83
%	3,11	2,38	1,49	-4,55	5,84	4,33	1,25

Tabla 0.18. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	15:30	14:45	14:00	13:45	13:30	13:15	13:15
> 100km ²	19:00	17:15	15:45	15:15	15:00	14:45	14:45
Diferencia	210	210	105	90	90	30	30

Tabla 0.19. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Al igual que en el método del SCS los caudales pico correspondientes a los hidrogramas de las subcuencas menores de 50 km² son superiores a los de las cuencas más grandes para todos los periodos de retorno. Pero las diferencias son mucho más elevadas que en el método anterior. Para el periodo de retorno de 5 años la variación es de un 50,47%, mientras que para el periodo de retorno de 1000 años la diferencia entre los caudales pico de ambos hidrogramas es de un 44,09%.

En volúmenes, para las subcuencas más pequeñas el volumen total de la cuenca completa en el punto de salida es mayor que para las subcuencas más grandes. Igual que en el método del SCS para el periodo de retorno de 100 años el volumen registrado por las subcuencas mayores de 100 km² supera el volumen recogido por las subcuencas más pequeñas.

En el análisis de los tiempos pico de cada hidrograma se observa un retardo del hidrograma correspondiente a las subcuencas más grandes con respecto al otro. Este retraso se ve disminuido con el aumento del periodo de retorno; para un periodo de retorno de 5 años la diferencia de tiempo entre los picos de los hidrogramas es de 210 minutos mientras que para el periodo de retorno de 1000 años el retardo es tan sólo de 30 minutos.

Este método es aconsejable para zonas donde la pendiente es pequeña, como es el caso de la cuenca del Albuñón. Sin embargo, en los resultados se observa un mal ajuste del hidrograma correspondiente a las subcuencas mayores de 100 km². Esto se debe en gran medida a la extensión de las subcuencas, lo que provoca una propagación deficiente de la avenida o laminación artificial.

Posteriormente se realiza una comparación entre los diferentes métodos aplicados a la cuenca para conseguir la transformación lluvia-caudal, para un mismo tamaño de cuenca.

Los hidrogramas de salida de la cuenca completa, comparando ambos métodos según el tamaño de las subcuencas, se representan en las figuras 0.12 (para un tamaño de las subcuencas menor a 50 km²) y 0.13 (para un tamaño de las subcuencas superior a 100 km²).

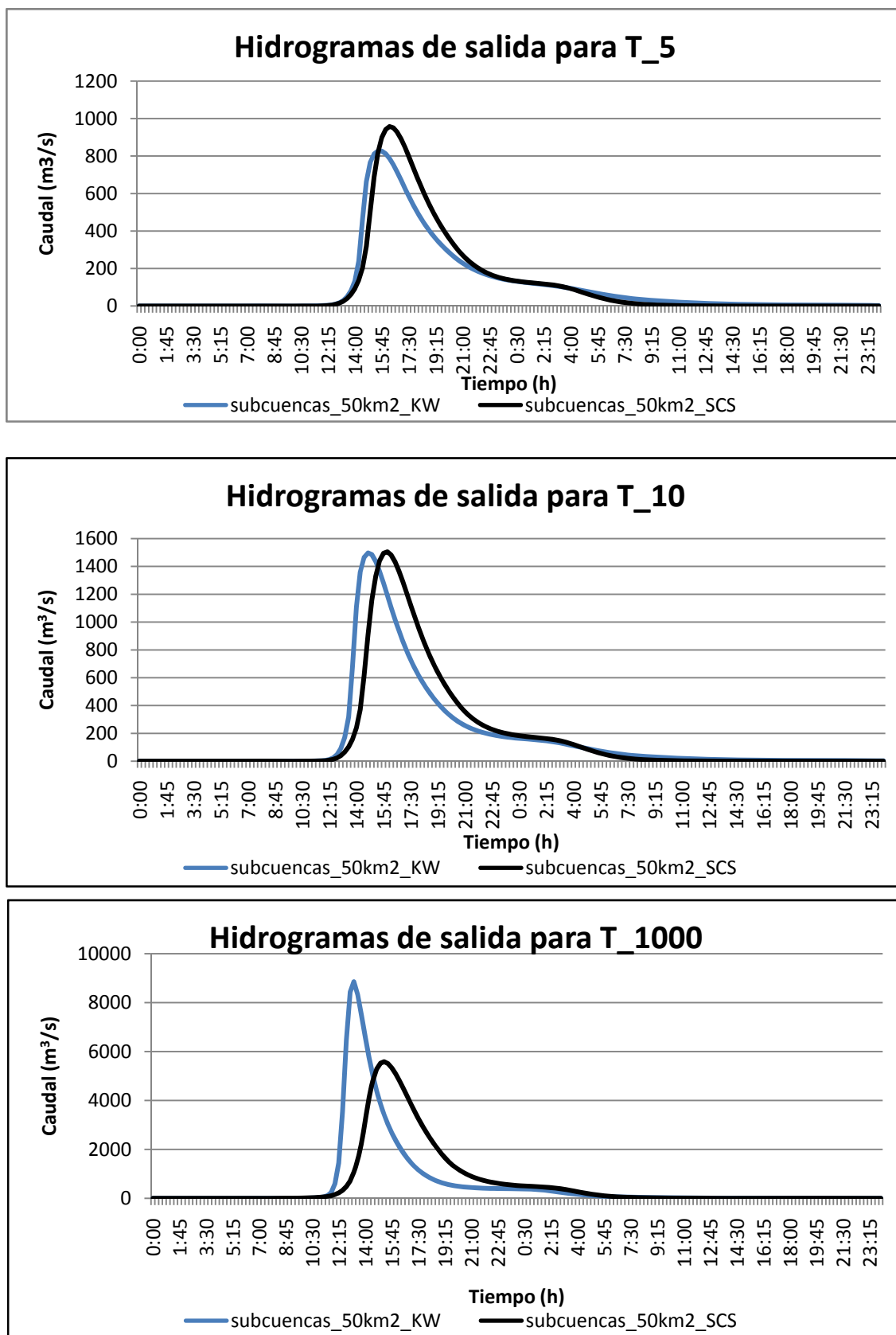


Fig.0.12. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos del KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para los periodos de retorno de 5, 10 y 1000 años

Las tablas comparativas de estos hidrogramas son las siguientes:

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	985	1553,5	2947,5	3340,9	4193,9	5051,9	5584,5
KW	853,2	1544,8	3663	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3
Diferencia	131,8	8,7	-715,5	-1029,4	-1773,8	-2536,9	-3272,8
%	13,38	0,56	-24,27	-30,81	-42,29	-50,21	-58,60

Tabla 0.20. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Volumen del hidrograma (mm)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	29,13	44,2	81,16	92,13	114,32	136,92	151,26
KW	27,91	42,36	77,7	88,59	109,6	131,79	146,73
Diferencia	1,22	1,84	3,46	3,54	4,72	5,13	4,53
%	4,18	4,16	4,26	3,84	4,12	3,75	2,99

Tabla 0.21. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	16:15	16:00	15:30	15:30	15:30	15:15	15:15
KW	15:30	14:45	14:00	13:45	13:30	13:15	13:15
Diferencia	-45	-90	-90	-105	-120	-120	-120

Tabla 0.22. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

En el caso de los caudales pico se observa una tendencia curiosa. Para los periodos de retorno más pequeños el método del SCS se impone ligeramente sobre el método de la Onda Cinemática. Por el contrario, a partir del periodo de retorno de 50 años el método de la Onda Cinemática presenta un valor del caudal pico superior al obtenido con el otro método y este valor va aumentando conforme lo hace el periodo de retorno. Esto podría deberse a que el método de la Onda Cinemática es muy sensible a los valores del coeficiente de rugosidad "N" para caudales pequeños. Para caudales más elevados, al tratarse de un método principalmente aplicable a zonas planas, la metodología que utiliza para conseguir la laminación de la avenida hace que se obtengan mejores resultados que los que se obtienen con el otro método.

Respecto al tiempo pico de los hidrogramas se puede ver claramente que el hidrograma correspondiente al método de la Onda Cinemática se adelanta, para todos los periodos de retorno, con respecto al método del SCS. A mayores valores del periodo de retorno mayor retraso del hidrograma del SCS.

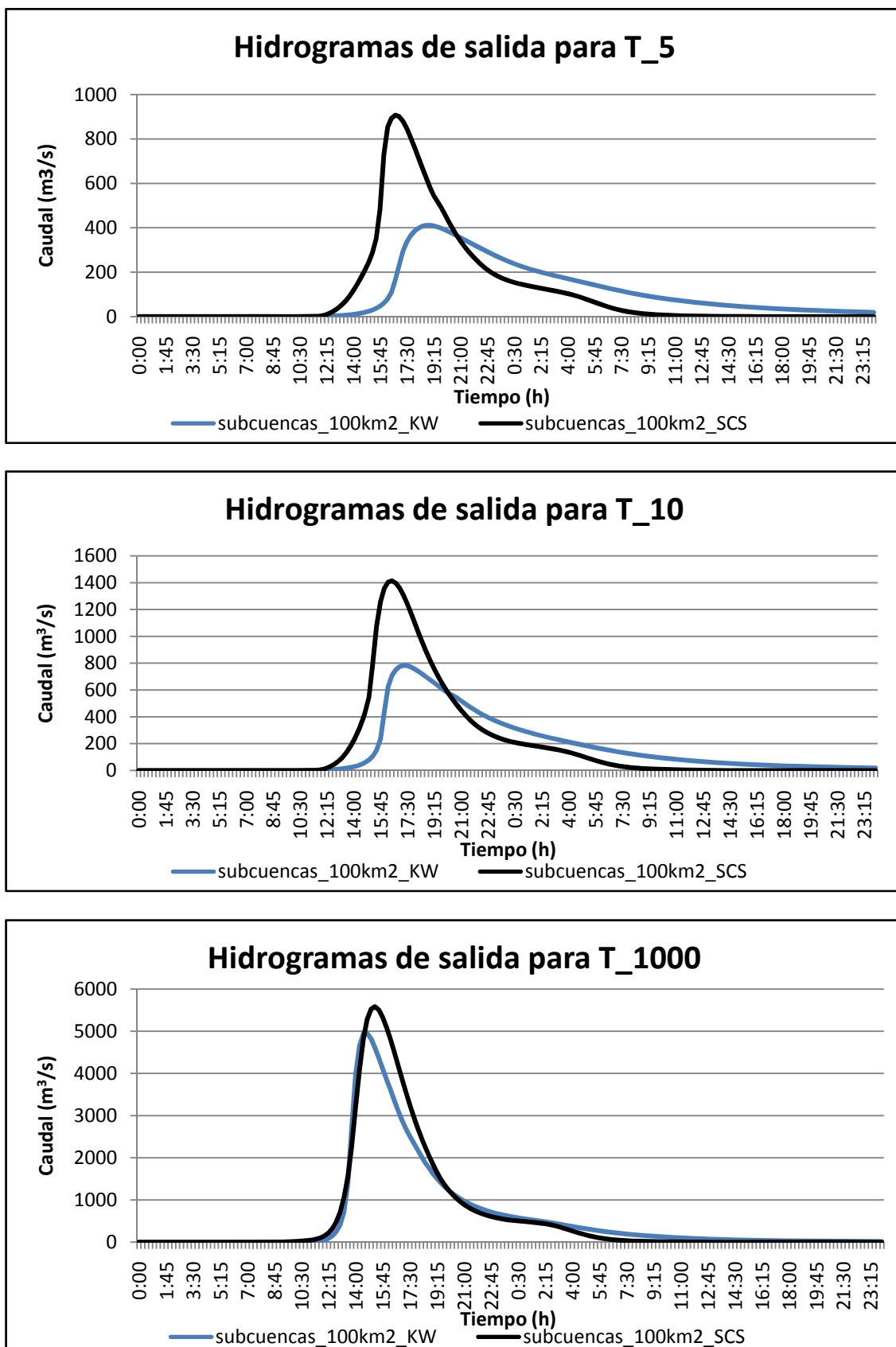


Fig. 0.13. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para los periodos de retorno de 5, 10 y 1000 años

Para observar con más precisión las diferencias entre ambos métodos se muestran las siguientes tablas:

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	907,1	1414	2663,4	3224	3788,2	4552,6	5019,2
KW	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,6
Diferencia	484,4	608,7	699,9	617	519,9	265,5	64,6
%	53,40	40,04	26,28	19,13	13,72	5,83	1,28

Tabla 0.23. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Volumen del hidrograma (mm)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	28,55	43,48	80,04	96,49	113,27	135,84	150,27
KW	27,04	41,35	76,54	92,62	108,96	131,22	144,9
Diferencia	1,51	2,13	3,5	3,87	4,31	4,62	5,37
%	5,28	4,89	4,37	4,01	3,80	3,40	3,57

Tabla 0.24. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	16:45	16:30	16:00	16:00	16:00	15:45	15:45
KW	19:00	17:15	15:45	15:15	15:00	14:45	14:45
Diferencia	135	45	-15	-45	-60	-60	-60

Tabla 0.25. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Para los tamaños de las subcuencas más grandes los datos entre ambos métodos son muy diferentes a los obtenidos con el tamaño de subcuencas más pequeñas. En este caso, para todos los periodos de retorno se observan caudales pico mayores para el método del SCS, sin embargo, para todos los periodos de retorno, el hidrograma correspondiente al método de la Onda Cinemática adelanta su pico con respecto al otro método.

De la comparación entre los dos métodos (Hidrograma Unitario del SCS y Onda Cinemática) es clara la influencia del tamaño de la subdivisión de la cuenca completa en los resultados. Para tamaños de subcuencas menores de 50 km² se ha observado cierta similitud entre los resultados de ambos métodos. Sin embargo, para las subcuencas mayores de 100 km² las diferencias aumentan. Para caudales pequeños el método de la Onda Cinemática es muy sensible a los valores del coeficiente de rugosidad "N" lo que provoca una laminación artificial de la avenida. Por tanto, para periodos de retorno pequeños en grandes superficies el método de cálculo que mejor se ajusta a los resultados es el método del SCS.

Por otro lado, el método de la Onda Cinemática es más apropiado para esta zona ya que funciona mejor en zonas con poca pendiente, como es el caso de la cuenca de la Rambla del Albujón. Sin embargo, para aplicarlo y que los resultados sean satisfactorios se requiere tener bien caracterizada la zona de estudio, tanto desde el punto de vista cartográfico, como del punto de vista de uso del suelo (teniendo una información de usos de suelo actualizada) con el fin de poder evaluar apropiadamente el coeficiente de rugosidad “N” y el porcentaje de terreno permeable e impermeable.

El hidrograma de salida de la cuenca completa generado por el programa HEC-HMS para el método de la Onda Cinemática y para un tamaño de subcuencas menor a 50 km² es el siguiente:

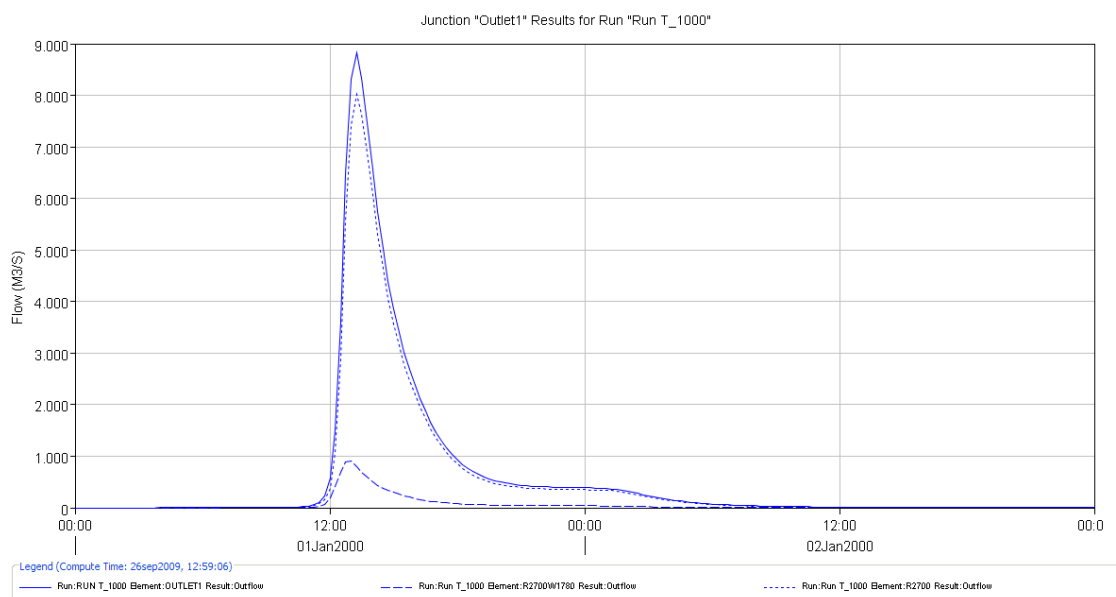


Fig.0.14. Hidrograma de salida de la cuenca completa aplicando el método de la Onda Cinemática, formada por subcuencas menores de 50 km² para 1000 años de periodo de retorno

0. Resumen

En este proyecto fin de carrera se realiza en primer lugar un análisis detallado y cálculo de la validación de los datos pluviométricos. En segundo lugar, un análisis de sensibilidad tanto del tamaño de la cuenca, como del método empleado (SCS y Onda Cinemática) en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas, para lo que se ha utilizado el programa semidistribuido HEC-HMS y el programa de información geográfica HEC-GeoHMS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

La zona de estudio está ubicada en la Rambla del Albujón, dentro de la Cuenca Hidrográfica del Río Segura. Se trata de una cuenca con una gran extensión y poca pendiente.

Partiendo de un Modelo Digital de elevación de la zona previamente elaborado, y con el programa HEC-GeoHMS se ha obtenido una capa con la delimitación de todas las subcuencas existentes en la cuenca. El resultado obtenido mediante su algoritmo de cálculo se puede apreciar en la siguiente figura, que representa el modelo original o “primitivo” sobre el que se va a trabajar.

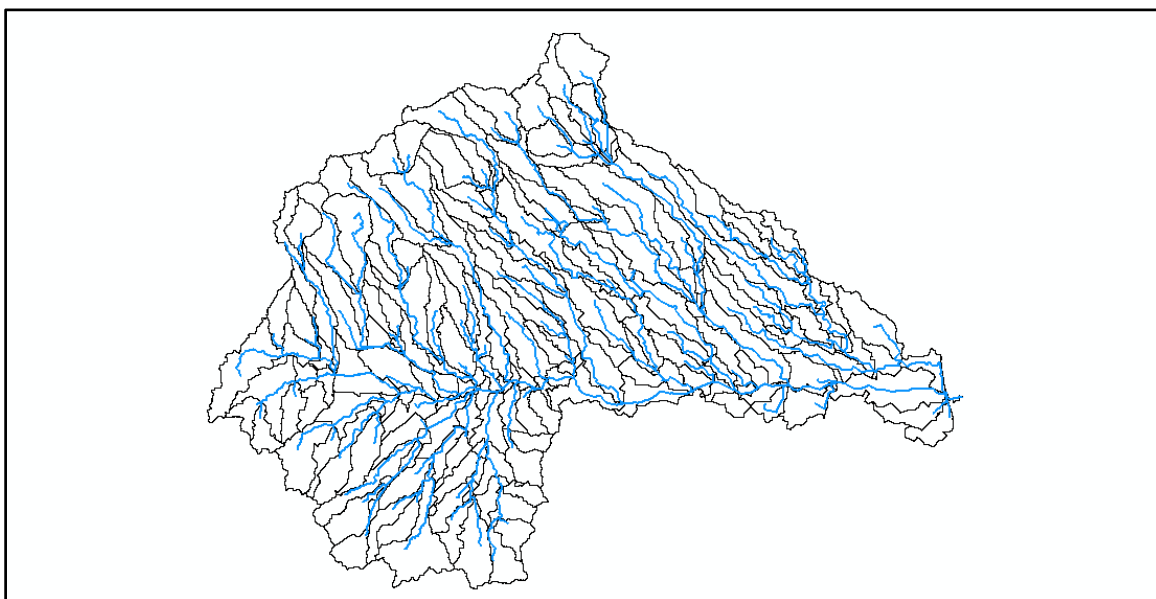
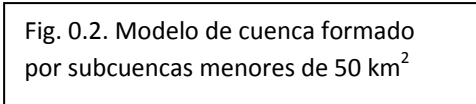


Fig. 0.1. Modelo de cuenca “primitivo”

A partir de la capa anterior y mediante agregación de subcuencas, se han obtenido dos modelos de cuenca con los distintos tamaños que se considerarán para el estudio de sensibilidad. Se compararán los resultados obtenidos a partir de un modelo formado por subcuencas mayores de 100 km² y un modelo con subcuencas menores de 50 km², representados en las siguientes figuras:



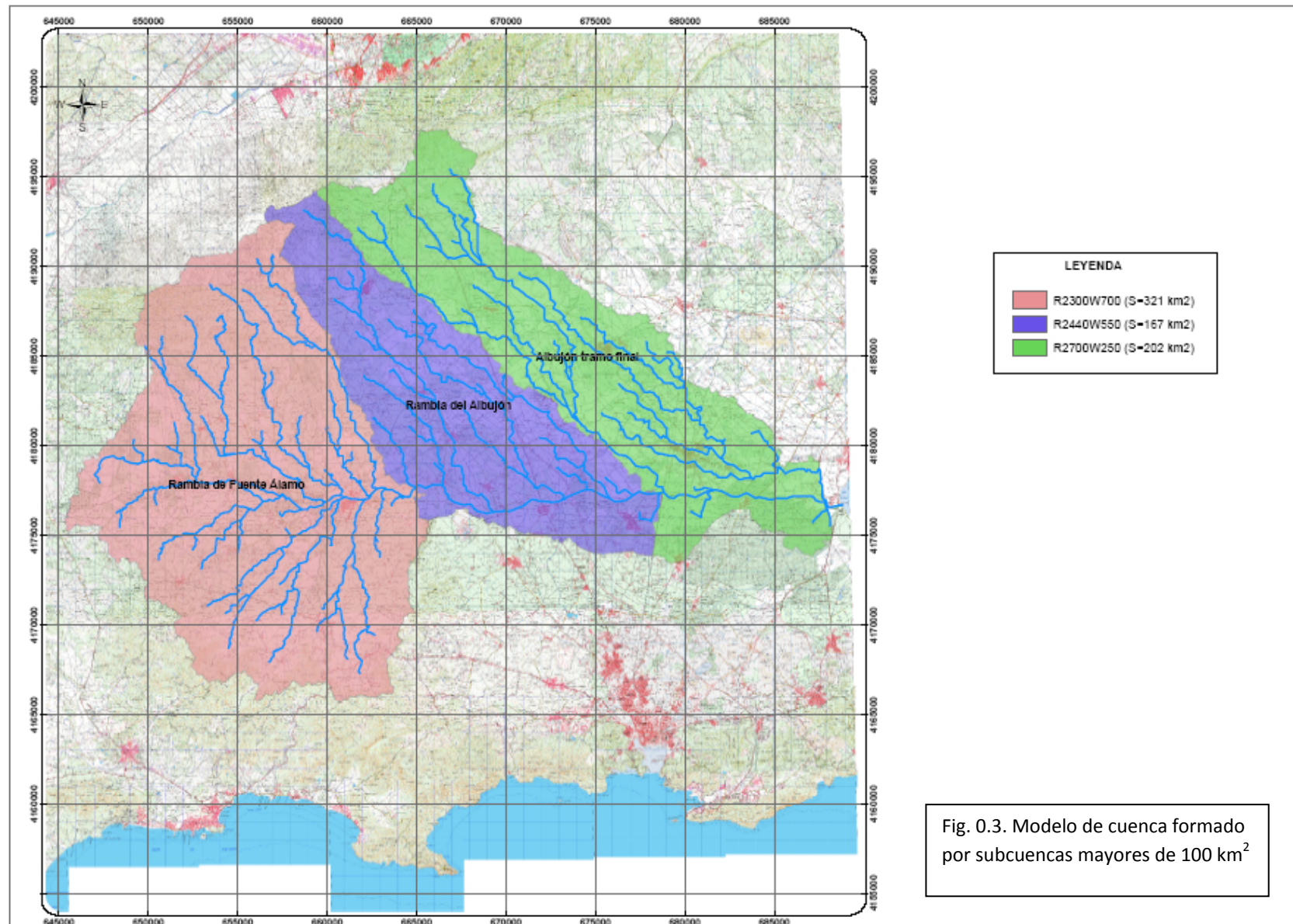


Fig. 0.3. Modelo de cuenca formado por subcuencas mayores de 100 km²

Una vez obtenidos los modelos de cuenca, con el programa HEC-GeoHMS se obtienen las características físicas de cada subcuenca y de los cauces.

Se ha de advertir que el programa Geo-HMS genera automáticamente los nombres de las subcuencas y tramos definidos en el modelo. Para ubicar más fácilmente las subcuencas, su nombre se ha cambiado por el real o por un nombre característico de la zona. En algunos documentos como los generados por HEC-HMS se emplean los creados automáticamente por el Geo-HMS. Con el fin de poder establecer la relación de una nomenclatura con otra, se presenta la siguiente tabla.

Subcuencas_50	HMS	Subcuencas_100	HMS
La Pinilla	R2660W2660	Rambla de Fuente Álamo	R2300W700
Loma del Mojón	R2180W1180	Rambla del Albuñón	R2440W550
Los Gálvez	R2660W860	Albuñón tramo final	R2700W250
Cuevas de Rylo	R2580W2200		
El Ventorrillo	R2190W990		
La Capellanía	R2630W2630		
Rambla de la Azohía	R2600W2600		
Rambla de Fuente Álamo	R2310W1660		
Rincón de Lobera	R2300W2300		
Rambla de la Murta	R1270W700		
Rambla del Fraile	R2770W1630		
Valladolises	R2480W550		
Albuñón	R2110W1160		
Los Martínez del Puerto	R1580W520		
Pozo Estrecho	R2440W1050		
Las Moreras	R2080W250		
Roldán	R1930W1130		
Albuñón tramo final	R2700W1780		

Tabla 0.0. Nomenclatura de las subcuencas de 50 km² y mayores de 100 km².

Los resultados obtenidos de las principales características físicas de las subcuencas son los siguientes:

Subcuencas mayores de 100 km ²	Long. máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
Albuñón tramo final	44,79	201,70	590	0
Rambla de Fuente Álamo	29,69	321,18	992	101
Rambla del Albuñón	40,26	167,90	624	41,90

Tabla 0.1. Características físicas de las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas menores de 50 km ²	Long. máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
La Pinilla	11,88	27,28	187,91	148,05
Loma del Mojón	14,13	34,22	306,75	169,98
Los Gálvez	22,03	30,69	232,94	122,84
Cuevas de Rylo	16,90	37,94	173,08	139,01
El Ventorrillo	22,70	36,06	233,28	126,36
La Capellanía	16,50	52,00	195,09	124,28
Rambla de la Azohía	15,09	39,78	162,00	116,98
Rambla de Fuente Álamo	13,66	15,61	168,38	110,94
Rincón de Lobera	10,67	16,00	134,32	101,00
Rambla de la Murta	22,68	31,60	254,52	113,13
Rambla del Fraile	18,32	28,46	151,15	76,94
Valladolises	29,64	43,37	223,00	76,94
Albujón	25,23	48,29	138,51	56,49
Los Martínez del Puerto	25,49	42,18	195,02	75,00
Pozo Estrecho	27,24	47,79	118,15	41,90
Las Moreras	32,27	52,10	136,84	38,43
Roldán	25,14	52,22	105,45	31,03
Albujón tramo final	23,44	55,21	34,02	0,00

Tabla 0.2. Características físicas de las subcuencas menores de 50 km²

Las características de los cauces se pueden apreciar en la siguiente tabla donde se indica la longitud del tramo, su pendiente, las características de su sección y el coeficiente de Manning adoptado.

Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coeficiente rugosidad
R2770	4056,9	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2700	1369,8	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2640	148,3	0,0021	Ocho puntos	0.035
R2610	4292,1	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2530	6991,8	0,0031	Ocho puntos	0.035
R2510	1553,3	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2460	215,6	0,0161	Ocho puntos	0.035
R2440	1701,7	0,0015	Ocho puntos	0.035
R2420	2949,1	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2410	283,5	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2400	1446,8	0,0047	Ocho puntos	0.035
R2390	1623,7	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2240	1769,7	0,0050	Ocho puntos	0.035

Tabla 0.3. Características físicas de los cauces para las subcuencas mayores de 100 km²

Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coefficiente de rugosidad
R2770	4056,9	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2700	1369,8	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2640	148,3	0,0021	Ocho puntos	0.035
R2670	1570,1	0,0081	Ocho puntos	0.035
R2610	4292,1	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2620	1644,9	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2590	1192,8	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2580	1288,2	0,0019	Ocho puntos	0.035
R2570	462,3	0,0071	Ocho puntos	0.035
R2550	296,9	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2540	343,0	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2530	6991,8	0,0031	Ocho puntos	0.035
R2510	1553,3	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2500	346,1	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2490	1028,4	0,0041	Ocho puntos	0.035
R2460	215,6	0,0161	Ocho puntos	0.035
R2440	1701,7	0,0015	Ocho puntos	0.035
R2420	2949,1	0,004	Ocho puntos	0.035
R2410	283,5	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2400	1446,8	0,0047	Ocho puntos	0.035
R2390	1623,7	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2350	598,2	0,0051	Ocho puntos	0.035
R2330	1245,6	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2310	629,3	0,0035	Ocho puntos	0.035
R2300	797,6	0,0051	Ocho puntos	0.035
R2240	1769,7	0,005	Ocho puntos	0.035
R2200	4585,4	0,0048	Ocho puntos	0.035
R2130	4869,6	0,0033	Ocho puntos	0.035
R2120	2053,2	0,0024	Ocho puntos	0.035
R2080	7557,8	0,0048	Ocho puntos	0.035
R2050	2384,5	0,0025	Ocho puntos	0.035

Tabla 0.4. Características físicas de los cauces para las subcuencas menores de 50 km²

Sobre las secciones que definen el cauce cabe decir que han sido obtenidas una a una a partir del MDE, y por medio del programa de información geográfica ArcGis. Para todos los tramos se ha calculado una sección media de ocho puntos.

El siguiente paso sería obtener los parámetros hidrológicos necesarios para el cálculo de los caudales. En este caso, dichos parámetros son el tiempo de concentración y el Número de Curva de cada subcuenca.

				TÉMEZ	
Subcuencas	Long. Máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Pendiente	Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
Rambla de Fuente Álamo	29,69	321,18	0,030	7,68	138,36
Rambla del Albuñón	40,26	167,9	0,014	11,19	201,55
Albuñón tramo final	44,79	201,7	0,013	12,31	221,65

Tabla 0.5. Tiempo de concentración y tiempo lag para las subcuencas mayores de 100 km²

					TÉMEZ	
Subcuencas	Cota superior (m)	Cota inferior (m)	Long. máxima de flujo (km)	Pendiente	Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
La Pinilla	187,91	148,05	11,888	0,012	4,56	95,80
Loma del Mojón	306,75	169,98	14,132	0,058	3,85	80,99
Los Gálvez	232,94	122,84	22,034	0,043	5,72	120,15
Cuevas de Ryllo	173,08	139,01	16,909	0,006	6,80	142,84
El Ventorrillo	233,28	126,36	22,702	0,022	6,64	139,60
La Capellanía	195,09	124,28	16,507	0,033	4,83	101,44
Rambla de la Azohía	162,00	116,98	15,099	0,023	4,83	101,53
Rambla de Fuente Álamo	168,38	110,94	13,660	0,017	4,74	99,65
Rincón de Lobera	134,32	101,00	10,673	0,015	4,02	84,60
Rambla de la Murta	254,52	113,13	22,689	0,030	6,26	131,55
Rambla del Fraile	151,15	76,94	18,326	0,012	6,33	133,11
Valladolises	223,00	76,94	29,649	0,018	8,45	177,65
Albuñón	138,51	56,49	25,231	0,009	8,53	179,26
Los Martínez del Puerto	195,02	75,00	25,492	0,020	7,39	155,24
Pozo Estrecho	118,15	41,90	27,241	0,010	8,86	186,25
Las Moreras	136,84	38,43	32,273	0,017	9,12	191,54
Roldán	105,45	31,03	25,144	0,008	8,70	182,84
Albuñón tramo final	34,02	0,00	23,444	0,005	9,02	189,56

Tabla 0.6. Tiempo de concentración y tiempo lag para las subcuencas menores de 50 km²

Para la obtención del Número de Curva se ha utilizado el método propuesto por el CEDEX. Este método asigna el valor de un número primo distinto a cada una de las características del terreno definidas en las tres capas de información utilizadas (pendientes, tipos de suelo y usos de suelo). Multiplicando las tres capas de información se obtiene una capa (que se llamará Número de Curva) como producto de ellas, que contiene la información característica del terreno combinada de las tres, reflejada en un número que será el resultado del producto de los tres números primos relativos a cada una de las capas. Posteriormente se reclasifica para obtener los Números de Curva.

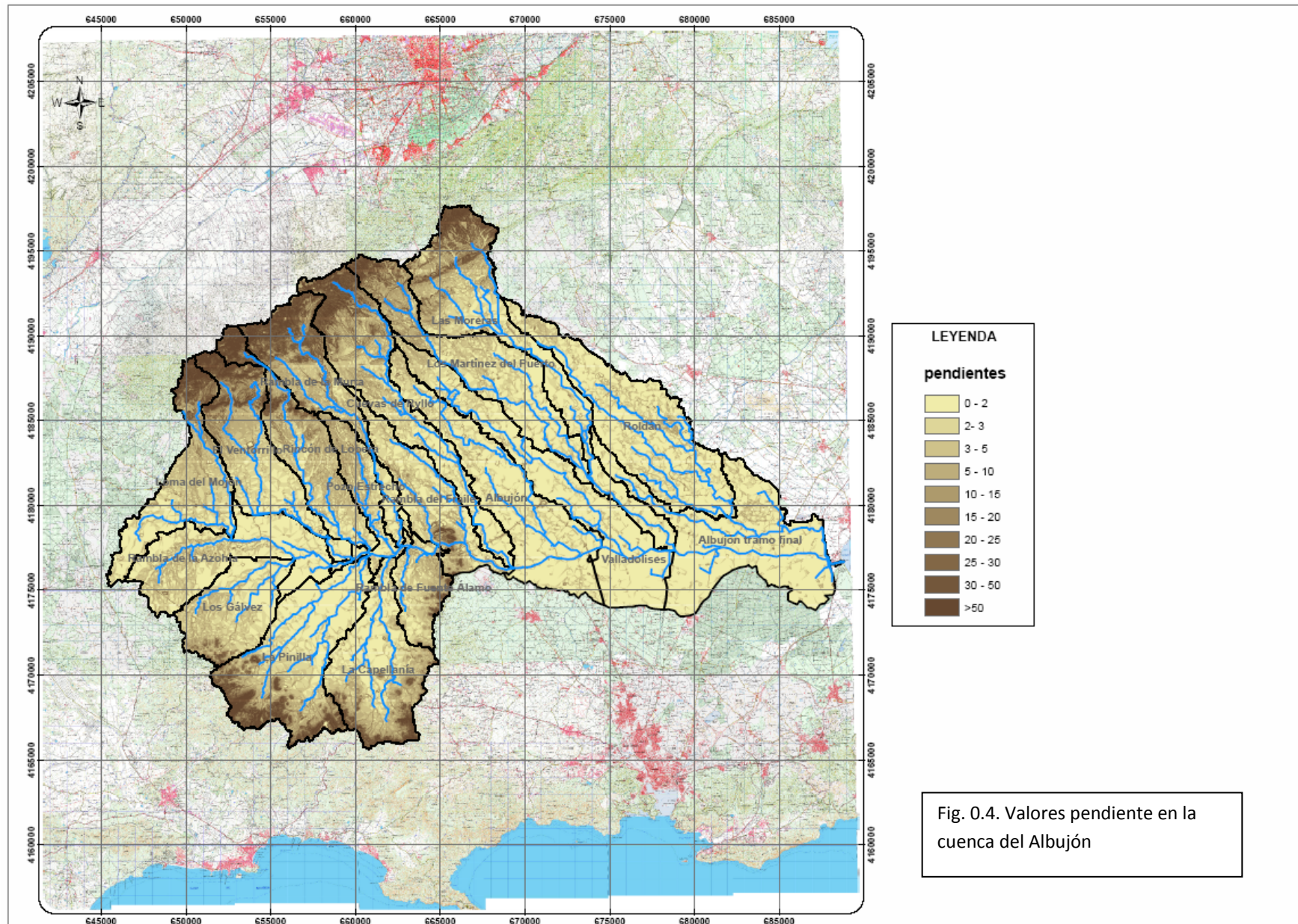
La reclasificación es sencilla de hacer ya que a cada valor numérico obtenido en la capa Número de Curva sólo podría corresponderle una única combinación de los 3 números primos asignadas a las tres variables (pendientes, usos y tipo de terreno), y que condiciona el valor del Número de Curva, así cada número producto de los tres primos tendrá asociado un único Número de Curva.

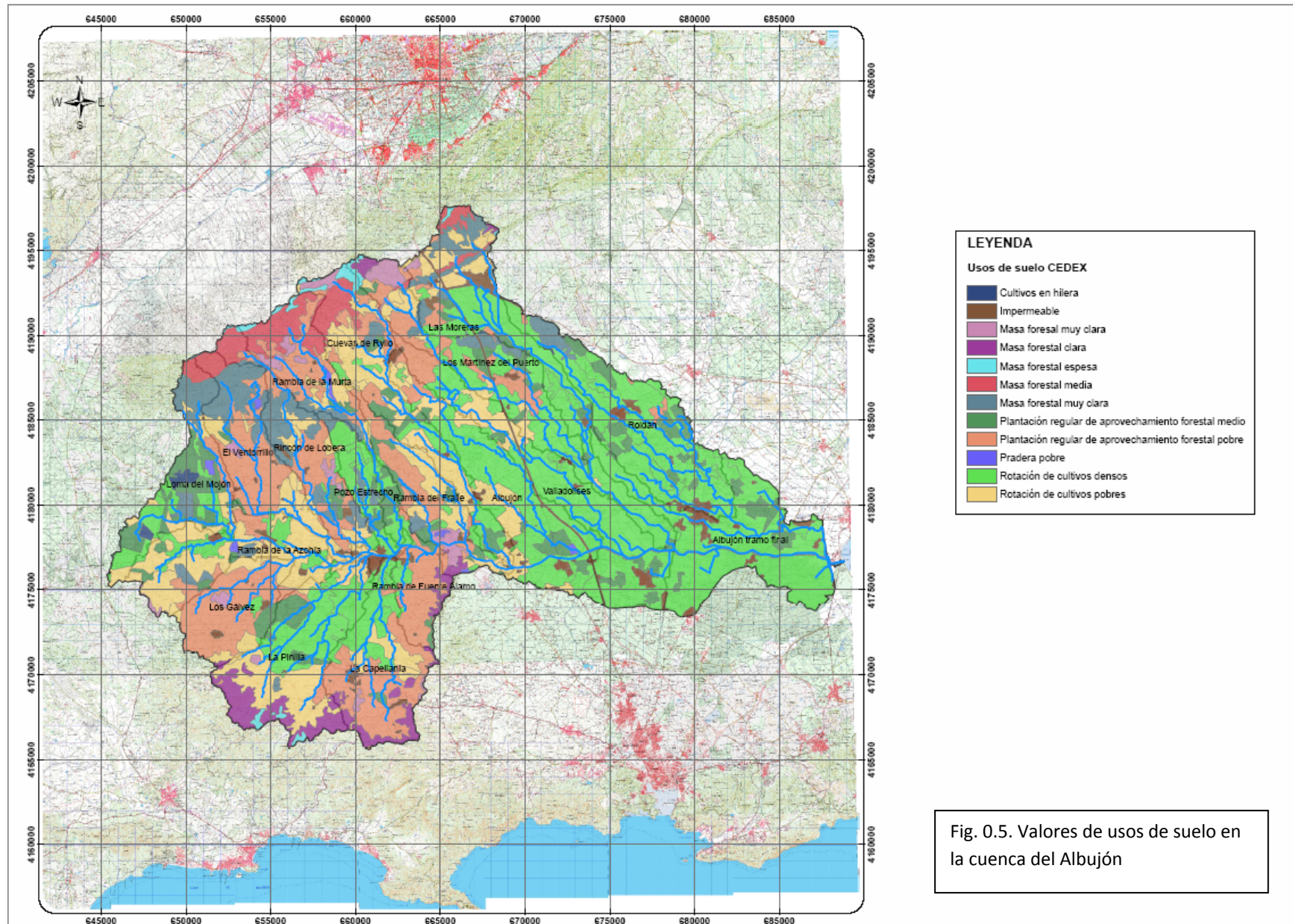
Subcuencas mayores de 100 km ²	CN
Rambla de Fuente Álamo	76
Rambla del Albuñón	77
Albuñón tramo final	76

Tabla 0.7. Números de curva para las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas menores de 50 km ²	CN
La Pinilla	76
Loma del Mojón	73
Los Gálvez	77
Cuevas de Ryllo	80
El Ventorrillo	75
La Capellanía	78
Rambla de la Azohía	76
Rambla de Fuente Álamo	81
Rincón de Lobera	73
Rambla de la Murta	74
Rambla del Fraile	77
Valladolises	77
Albuñón	78
Pozo Estrecho	77
Los Martínez del Puerto	78
Las Moreras	79
Roldán	77
Albuñón tramo final	76

Tabla 0.8. Números de curva para las subcuencas menores de 50 km²





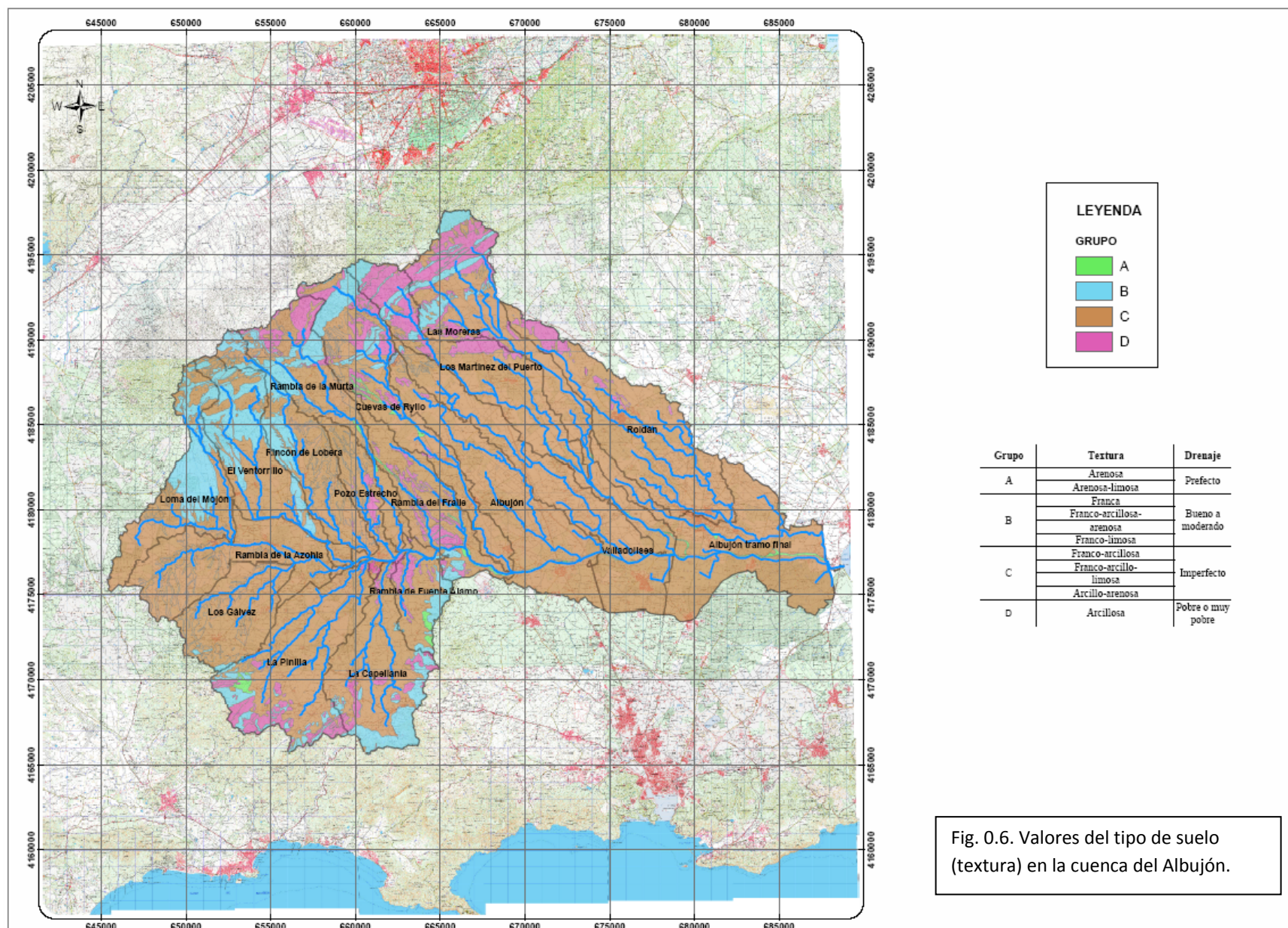
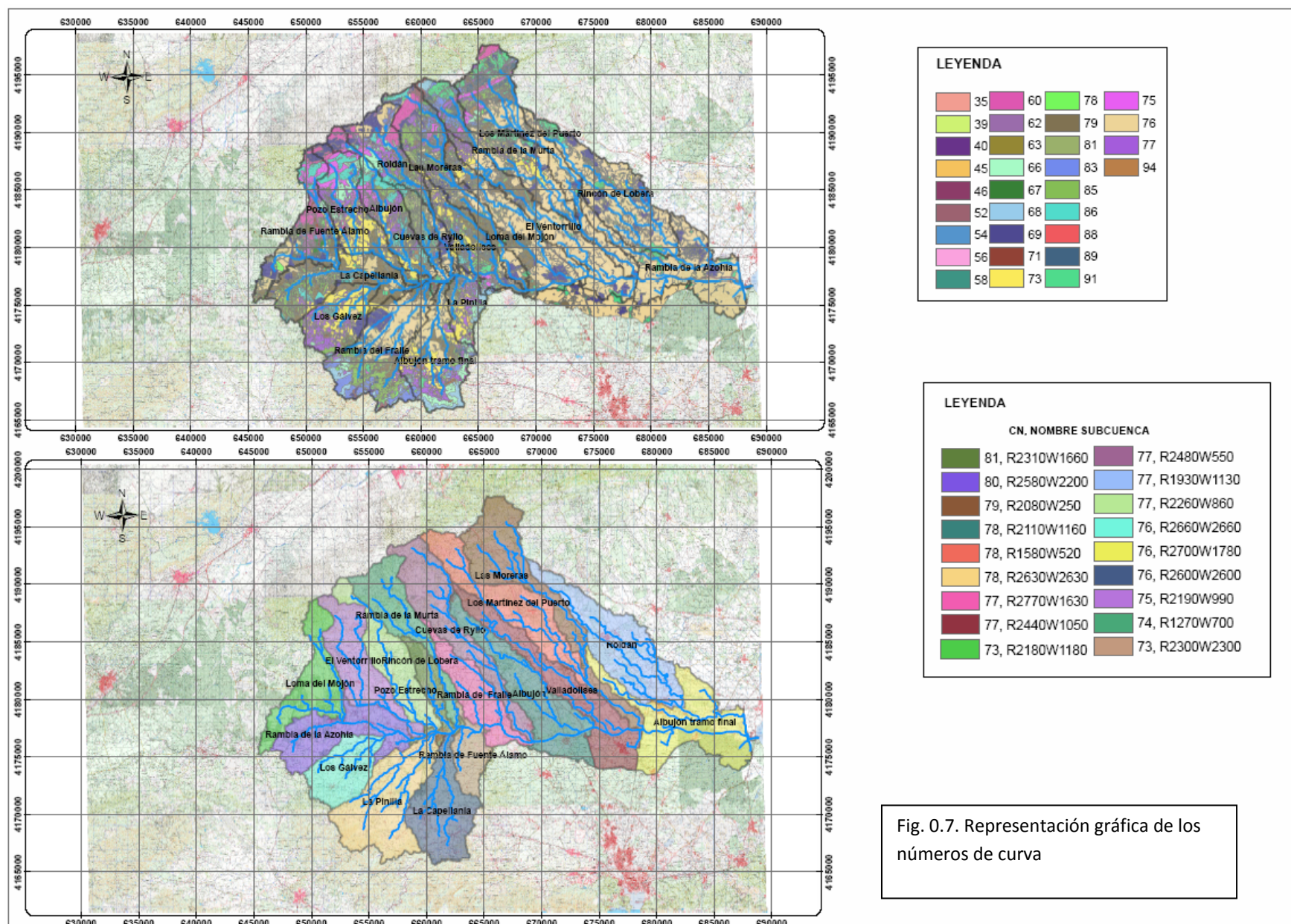


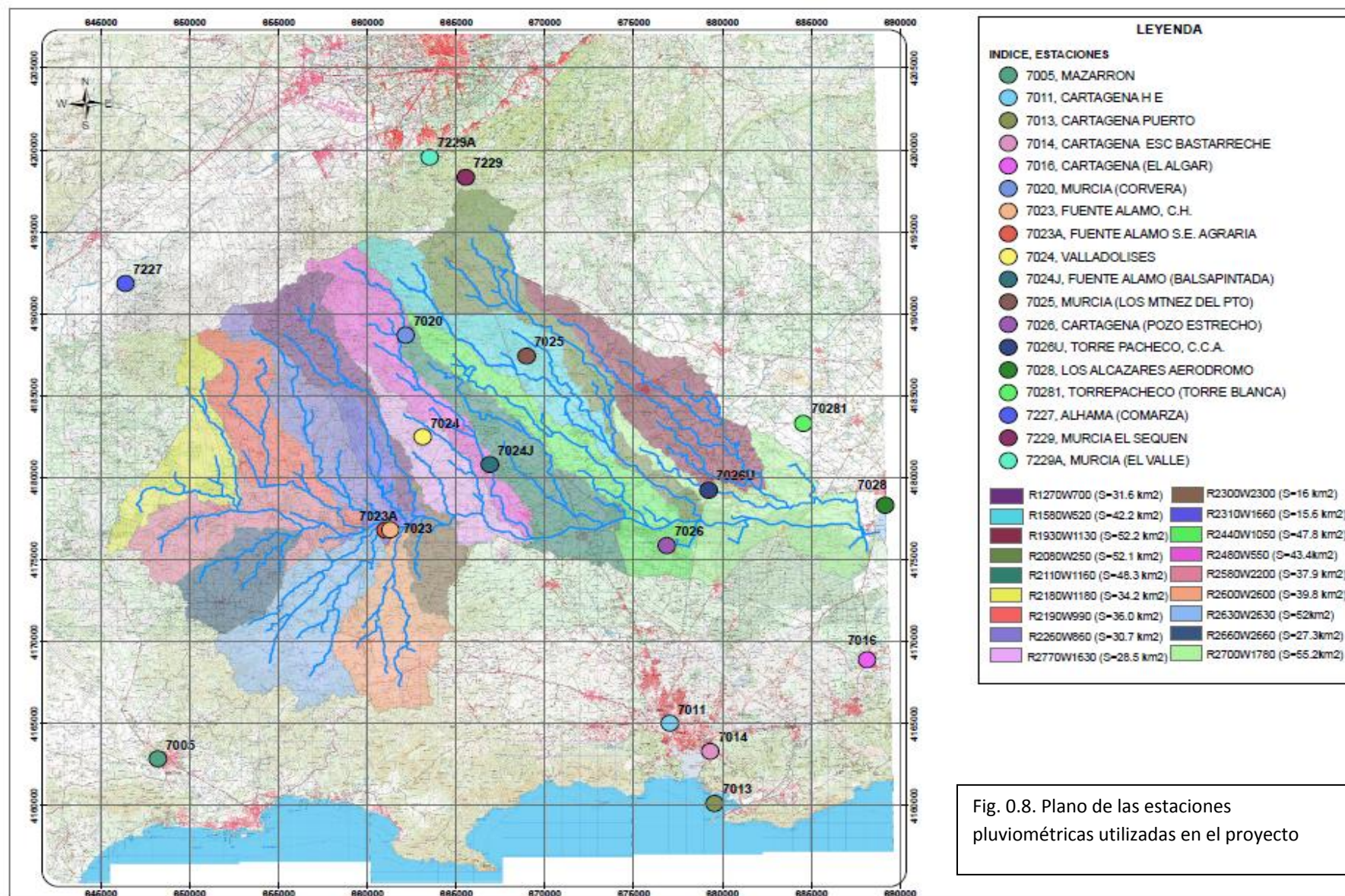
Fig. 0.6. Valores del tipo de suelo (textura) en la cuenca del Albuñón.

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas



Los datos pluviométricos que han sido utilizados son los de precipitaciones máximas diarias en 24 horas correspondientes a las estaciones pluviométricas más cercanas a la cuenca de estudio (ver lámina siguiente). Datos que fueron facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet).

Para su validación se utilizó el Método de las Dobles Masas, con el fin de analizar la consistencia de los datos y verificar que las condiciones de medida de los datos no han variado a lo largo del tiempo ni del espacio.



Una vez obtenidos los datos de precipitaciones máximas diarias corregidos, se les aplica un ajuste estadístico por medio de una función de distribución. En este caso se ha utilizado la función de Gumbel para obtener la precipitación total diaria correspondiente a cada periodo de retorno.

Los valores obtenidos mediante la función de Gumbel han sido comparados con los obtenidos mediante el método de las Máximas Lluvias en la España Peninsular, y se ha elegido aquellos datos con mayor valor de la precipitación. En este caso se observó que los valores obtenidos mediante la función de distribución de Gumbel son superiores.

Los valores obtenidos con este ajuste para cada una de las subcuencas se muestran a continuación:

Estaciones	Precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno (mm)					
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500
Murcia (El Valle)	69,82	85,67	120,55	135,29	149,98	169,36
Murcia El Sequen	65,91	85,20	127,66	145,60	163,49	187,08
Murcia (Corvera)	73,74	91,08	129,23	145,37	161,44	182,64
Murcia (Los Martínez del Puerto)	79,30	98,73	141,49	159,57	177,58	201,34
Alhama (Comarza)	82,72	103,37	148,84	168,05	187,20	212,47
Mazarrón	111,11	140,66	205,69	233,19	260,58	296,72
Fuente Álamo S.E. Agraria	70,52	86,96	123,14	138,43	153,67	173,78
Fuente Álamo C.H.	78,16	93,13	126,05	139,97	153,84	172,14
Fuente Álamo Balsapintada	84,49	109,51	164,58	187,86	211,05	241,66
Valladolides	79,62	100,64	146,91	166,47	185,96	211,67
Cartagena (Pozo Estrecho)	81,74	100,76	142,62	160,32	177,95	201,22
Torre-Pacheco C.C.A.	80,00	100,78	146,52	165,86	185,12	210,54
Torre-Pacheco (Torreblanca)	80,21	100,94	146,57	165,86	185,08	210,44
Los Alcázares Aeródromo	106,16	145,28	231,38	267,78	304,05	351,89
Cartagena H.E.	76,88	96,41	139,38	157,55	175,65	199,53
Cartagena Esc. Bastarreche	83,41	105,48	154,06	174,60	195,06	222,06
Cartagena (El Algar)	92,31	111,88	154,94	173,14	191,28	215,21
Cartagena Puerto	82,81	105,24	154,62	175,50	196,30	223,74

Tabla 0.9. Resultados del ajuste mediante la función de distribución de Gumbel

Para obtener la precipitación máxima diaria correspondiente a cada subcuenca se ha utilizado el método de los Polígonos de Thiessen. Este método trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos mediante este método son:

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen (mm)						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Rambla de Fuente Álamo	79,11	98,45	141,00	158,99	176,91	200,55	211,27
Rambla del Albuñón	80,13	101,20	147,57	167,17	186,70	212,47	232,05
Albuñón tramo final	80,10	101,49	148,58	168,49	188,32	214,49	234,87

Tabla 0.11. Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen para las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen (mm)						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
La Pinilla	79,45	98,78	141,32	159,30	177,22	200,86	218,73
Loma del Mojón	79,79	99,37	142,48	160,70	178,86	202,82	220,94
Los Gálvez	76,05	94,88	136,33	153,86	171,32	194,35	211,77
Cuevas de Ryllo	75,33	93,33	132,93	149,67	166,35	188,36	205,00
El Ventorrillo	75,86	94,29	134,86	152,01	169,10	191,64	144,73
La Capellanía	91,97	118,26	176,13	200,59	224,96	257,12	281,42
Rambla de la Azohía	74,66	90,30	124,73	139,28	153,78	172,91	187,40
Rambla de Fuente Álamo	77,46	96,24	137,57	155,04	172,45	195,42	212,78
Rincón de Lobera	78,17	93,21	126,31	140,30	154,24	172,64	186,56
Rambla de la Murta	75,13	92,96	132,20	148,78	165,31	187,11	203,61
Rambla del Fraile	81,47	103,72	152,68	173,38	194,00	221,21	241,77
Valladolises	76,76	96,18	138,91	156,98	174,98	198,72	216,69
Albuñón	82,22	104,93	154,89	176,01	197,06	224,83	245,82
Los Martínez del Puerto	77,31	96,09	137,41	154,88	172,29	195,25	212,45
Pozo Estrecho	80,70	101,07	145,89	164,84	183,72	208,62	226,76
Las Moreras	74,10	93,37	135,77	153,69	171,55	195,11	211,23
Roldán	79,77	100,08	144,78	163,67	182,50	207,34	226,13
Albuñón tramo final	89,17	116,20	175,67	200,82	225,87	258,92	283,93

Tabla 0.12. Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen para las subcuencas menores de 50 km²

En el caso de la precipitación de cálculo, para este estudio se ha considerado oportuno utilizar el patrón del proyecto LINDE modificado. Con esto se consigue la distribución temporal de la precipitación. Se concentra el 80% de la precipitación en las 6 horas centrales, manteniendo la distribución original del patrón y el 20% restante se ha distribuido en las 9 horas anteriores y posteriores. El patrón queda de la siguiente forma:

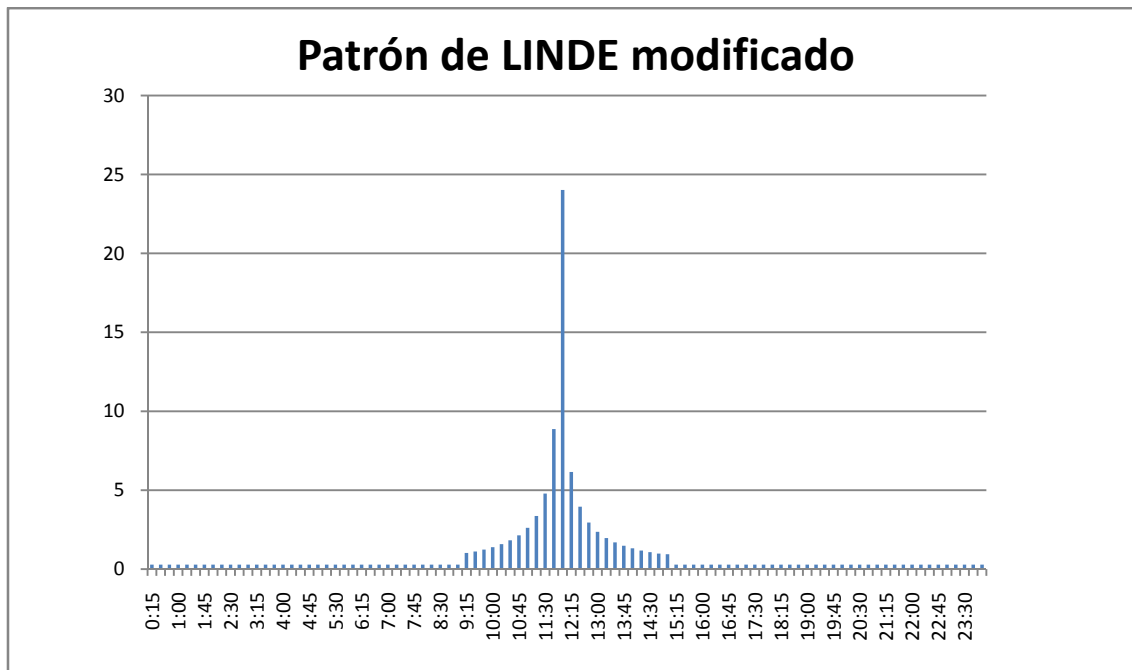


Fig.0.9. Patrón de precipitación de LINDE modificado

Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios para la simulación del modelo de cuenca en HEC-HMS, se procede a introducir los datos en el programa y observar los resultados.

Los métodos de cálculo elegidos en este estudio son:

- Método del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS) para las pérdidas por infiltración.
- Hidrograma Unitario del SCS para el proceso de transformación lluvia-caudal
- Onda Cinemática para el proceso de transformación lluvia-caudal, como método alternativo al método del SCS.
- Método de Muskingum-Cunge para los tránsitos en cauce.

En primer lugar se realizará la transformación lluvia-caudal mediante el método del SCS. Los caudales de salida de la cuenca completa para los distintos tamaños de cuenca y para el periodo de retorno de 1000 años se pueden observar en la siguiente figura.

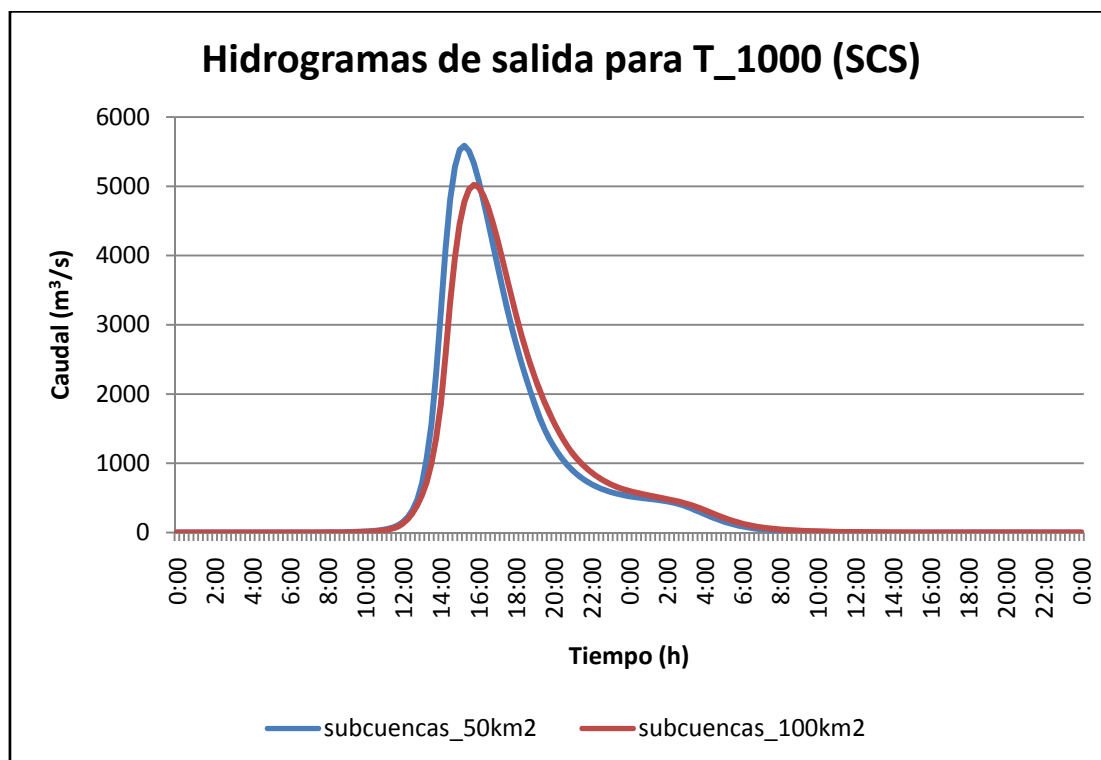


Fig. 0.10. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 1000 años

Este hidrograma indica que los caudales para las subcuencas menores de 50 km² son ligeramente superiores a los caudales resultantes para las subcuencas con más de 100 km². Con esto se aprecia fácilmente que a menor tamaño de cuenca, más exactos serán los resultados.

Los datos obtenidos por el método SCS se han contrastado con los caudales calculados mediante el método de la Instrucción. Los resultados para la cuenca completa son:

Subcuencas mayores de 100 km2							
	T_5	T_10	T_50	T_100	T_200	T_500	T_1000
Instrucción	804,03	1277,80	2513,69	3092,48	3692,90	4513,59	5043,26
SCS	907,10	1414,00	2663,40	3224,00	3788,90	4552,6	5019,2
Diferencia en %	-11,36%	-9,63%	-5,62%	-4,07%	-2,53%	-0,85%	0,48%

Subcuencas menores de 50 km2							
	T_5	T_10	T_50	T_100	T_200	T_500	T_1000
Instrucción	1009,84	1574,68	3022,28	3691,66	4381,95	5320,08	5915,31
SCS	985,00	1553,50	2947,50	3340,90	4193,90	5051,90	5584,5
Diferencia en %	2,46%	1,36%	2,47%	9,5%	4,29%	5,04%	5,59%

Tabla 0.13. Comparación de caudales en m³/s obtenidos con HEC-HMS (LINDE modificado) y la Instrucción con un coeficiente corrector de P₀ de 1,5

La diferencia entre ambos métodos está referida al método de la Instrucción. Con respecto a la diferencia de ambos métodos para las subcuencas mayores de 100 km² se observa que, para el método de la Instrucción los caudales punta son menores con respecto al método del SCS, excepto para el periodo de retorno de 1000 años. Por el contrario, para las subcuencas menores de 50 km² los caudales punta mayores se obtienen con el método de la Instrucción

Para poder analizar con mayor exactitud las diferencias entre los hidrogramas para cada periodo de retorno calculados con el método del SCS, se muestran unas tablas donde se compara el caudal pico de ambos hidrogramas, así como los volúmenes y el tiempo de retardo entre un hidrograma y otro. La diferencia está en función de las subcuencas menores a 50 km².

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	985	1553,5	2947,5	3340,9	4193,9	5051,9	5584,5
> 100km ²	907,1	1414	2663,4	3224	3788,2	4552,6	5019,2
Diferencia	77,9	139,5	284,1	116,9	405,7	499,3	565,3
%	7,91	8,95	9,63	3,49	9,67	9,88	10,12

Tabla 0.14. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Volumen del hidrograma (mm)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	29,13	44,2	81,16	92,13	114,32	136,92	151,26
> 100km ²	28,55	43,48	80,04	96,49	113,27	135,84	150,27
Diferencia	0,58	0,72	1,12	-4,36	1,05	1,08	0,99
%	1,99	1,62	1,37	-4,73	0,91	0,79	0,65

Tabla 0.15. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	16:15	16:00	15:30	15:30	15:30	15:15	15:15
> 100km ²	16:45	16:30	16:00	16:00	16:00	15:45	15:45
Diferencia	30	30	30	30	30	30	30

Tabla 0.16. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Observando las tablas se aprecia que, para el caso del caudal pico, el correspondiente al hidrograma para las subcuencas menores de 50 km² es superior al del hidrograma para las subcuencas mayores. Para el periodo de retorno de 100 años esta diferencia es muy pequeña, del 3,49%, sin embargo, va aumentando conforme lo hace el periodo de retorno, llegando hasta un 10,12% para el periodo de retorno de 1000 años.

Para el volumen total de los hidrogramas, las subcuencas menores de 50 km² contienen un volumen ligeramente superior al de las subcuencas de mayor tamaño, excepto para el periodo de retorno de 100 años, donde el volumen total que recogen las subcuencas mayores supera en un 4,73% al volumen de las subcuencas más pequeñas.

En el caso del tiempo pico de cada hidrograma, se aprecia claramente, tanto en la tabla como en los gráficos, el retraso de unos 30 minutos del hidrograma que presentan las subcuencas más grandes con respecto al tiempo pico del hidrograma correspondiente a las subcuencas menores de 50 km², para todos los periodos de retorno.

A continuación se muestran los hidrogramas correspondientes a la transformación lluvia-caudal mediante el método de la Onda Cinemática comparando los distintos tamaños de subcuencas y para el periodo de retorno de 1000 años.

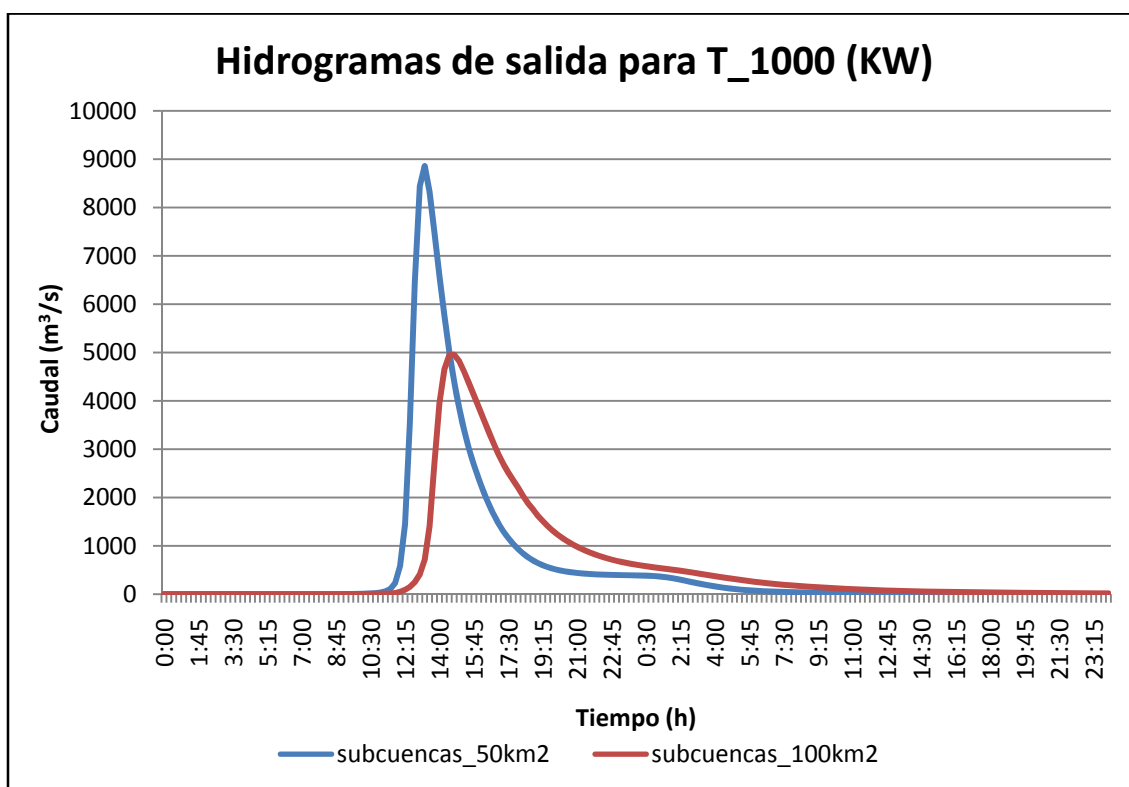


Fig. 0.11. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 1000 años

En este método se observa claramente que los caudales a la salida de la cuenca completa varían mucho en el caso de realizar el proceso con distintos tamaños de cuenca.

Al igual que para el método anterior, para tener una idea más clara de las diferencias entre los resultados obtenidos según los tamaños de las subcuencas, se muestran las siguientes tablas comparativas.

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	853,2	1544,8	3663	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3
> 100km ²	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,6
Diferencia	430,5	739,5	1699,5	1763,3	2699,4	3301,7	3902,7
%	50,47	47,87	46,39	40,34	45,23	43,50	44,06

Tabla 0.17. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Volumen del hidrograma (mm)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	27,91	42,36	77,7	88,59	109,6	131,79	146,73
> 100km ²	27,04	41,35	76,54	92,62	108,96	131,22	144,9
Diferencia	0,87	1,01	1,16	-4,03	0,64	0,57	1,83
%	3,11	2,38	1,49	-4,55	5,84	4,33	1,25

Tabla 0.18. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	15:30	14:45	14:00	13:45	13:30	13:15	13:15
> 100km ²	19:00	17:15	15:45	15:15	15:00	14:45	14:45
Diferencia	210	210	105	90	90	30	30

Tabla 0.19. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Al igual que en el método del SCS los caudales pico correspondientes a los hidrogramas de las subcuencas menores de 50 km² son superiores a los de las cuencas más grandes para todos los periodos de retorno. Pero las diferencias son mucho más elevadas que en el método anterior. Para el periodo de retorno de 5 años la variación es de un 50,47%, mientras que para el periodo de retorno de 1000 años la diferencia entre los caudales pico de ambos hidrogramas es de un 44,09%.

En volúmenes, para las subcuencas más pequeñas el volumen total de la cuenca completa en el punto de salida es mayor que para las subcuencas más grandes. Igual que en el método del SCS para el periodo de retorno de 100 años el volumen registrado por las subcuencas mayores de 100 km² supera el volumen recogido por las subcuencas más pequeñas.

En el análisis de los tiempos pico de cada hidrograma se observa un retardo del hidrograma correspondiente a las subcuencas más grandes con respecto al otro. Este retraso se ve disminuido con el aumento del periodo de retorno; para un periodo de retorno de 5 años la diferencia de tiempo entre los picos de los hidrogramas es de 210 minutos mientras que para el periodo de retorno de 1000 años el retardo es tan sólo de 30 minutos.

Este método es aconsejable para zonas donde la pendiente es pequeña, como es el caso de la cuenca del Albuñón. Sin embargo, en los resultados se observa un mal ajuste del hidrograma correspondiente a las subcuencas mayores de 100 km². Esto se debe en gran medida a la extensión de las subcuencas, lo que provoca una propagación deficiente de la avenida o laminación artificial.

Posteriormente se realiza una comparación entre los diferentes métodos aplicados a la cuenca para conseguir la transformación lluvia-caudal, para un mismo tamaño de cuenca.

Los hidrogramas de salida de la cuenca completa, comparando ambos métodos según el tamaño de las subcuencas, se representan en las figuras 0.12 (para un tamaño de las subcuencas menor a 50 km²) y 0.13 (para un tamaño de las subcuencas superior a 100 km²).

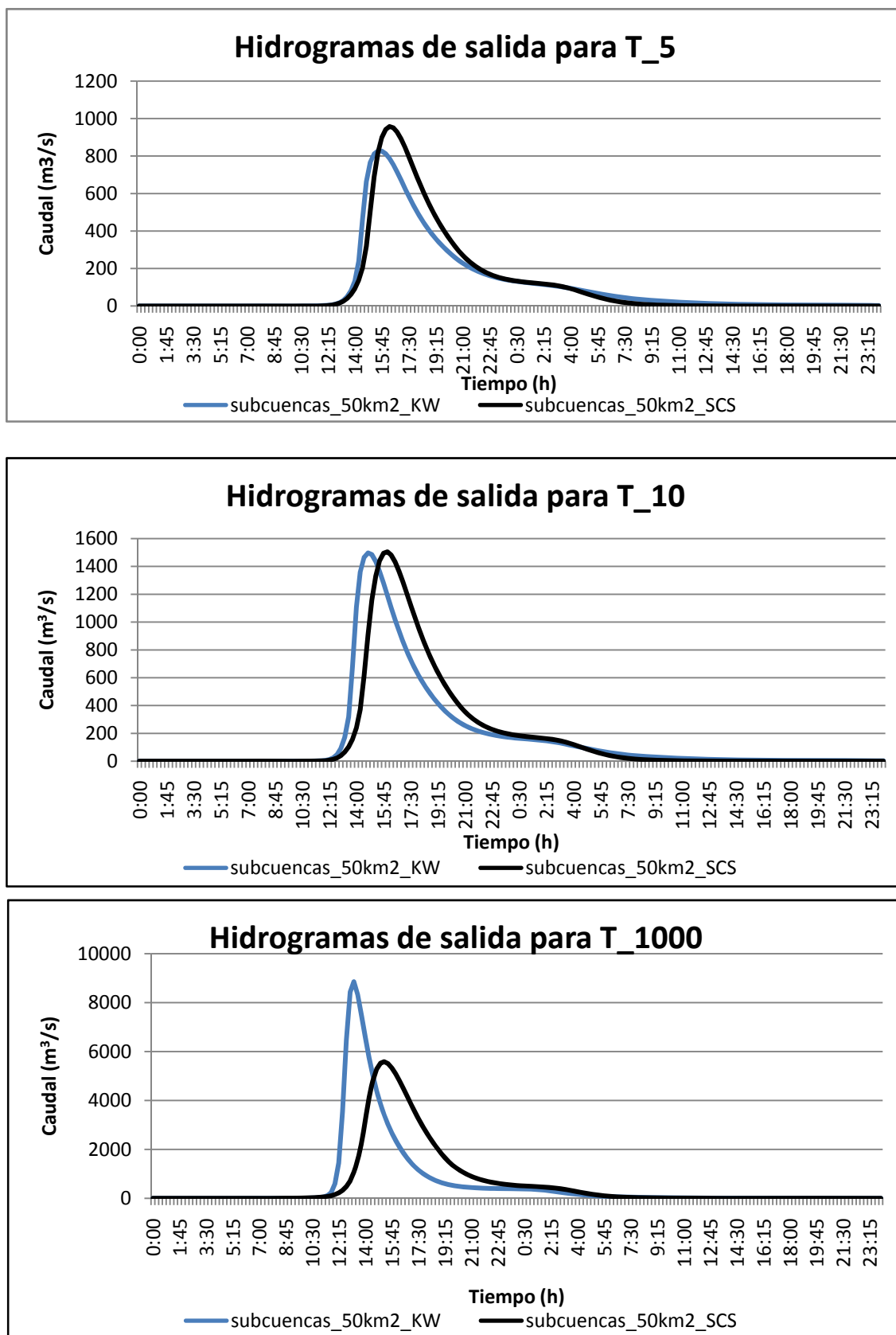


Fig.0.12. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos del KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para los periodos de retorno de 5, 10 y 1000 años

Las tablas comparativas de estos hidrogramas son las siguientes:

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	985	1553,5	2947,5	3340,9	4193,9	5051,9	5584,5
KW	853,2	1544,8	3663	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3
Diferencia	131,8	8,7	-715,5	-1029,4	-1773,8	-2536,9	-3272,8
%	13,38	0,56	-24,27	-30,81	-42,29	-50,21	-58,60

Tabla 0.20. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Volumen del hidrograma (mm)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	29,13	44,2	81,16	92,13	114,32	136,92	151,26
KW	27,91	42,36	77,7	88,59	109,6	131,79	146,73
Diferencia	1,22	1,84	3,46	3,54	4,72	5,13	4,53
%	4,18	4,16	4,26	3,84	4,12	3,75	2,99

Tabla 0.21. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	16:15	16:00	15:30	15:30	15:30	15:15	15:15
KW	15:30	14:45	14:00	13:45	13:30	13:15	13:15
Diferencia	-45	-90	-90	-105	-120	-120	-120

Tabla 0.22. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

En el caso de los caudales pico se observa una tendencia curiosa. Para los periodos de retorno más pequeños el método del SCS se impone ligeramente sobre el método de la Onda Cinemática. Por el contrario, a partir del periodo de retorno de 50 años el método de la Onda Cinemática presenta un valor del caudal pico superior al obtenido con el otro método y este valor va aumentando conforme lo hace el periodo de retorno. Esto podría deberse a que el método de la Onda Cinemática es muy sensible a los valores del coeficiente de rugosidad “N” para caudales pequeños. Para caudales más elevados, al tratarse de un método principalmente aplicable a zonas planas, la metodología que utiliza para conseguir la laminación de la avenida hace que se obtengan mejores resultados que los que se obtienen con el otro método.

Respecto al tiempo pico de los hidrogramas se puede ver claramente que el hidrograma correspondiente al método de la Onda Cinemática se adelanta, para todos los periodos de retorno, con respecto al método del SCS. A mayores valores del periodo de retorno mayor retraso del hidrograma del SCS.

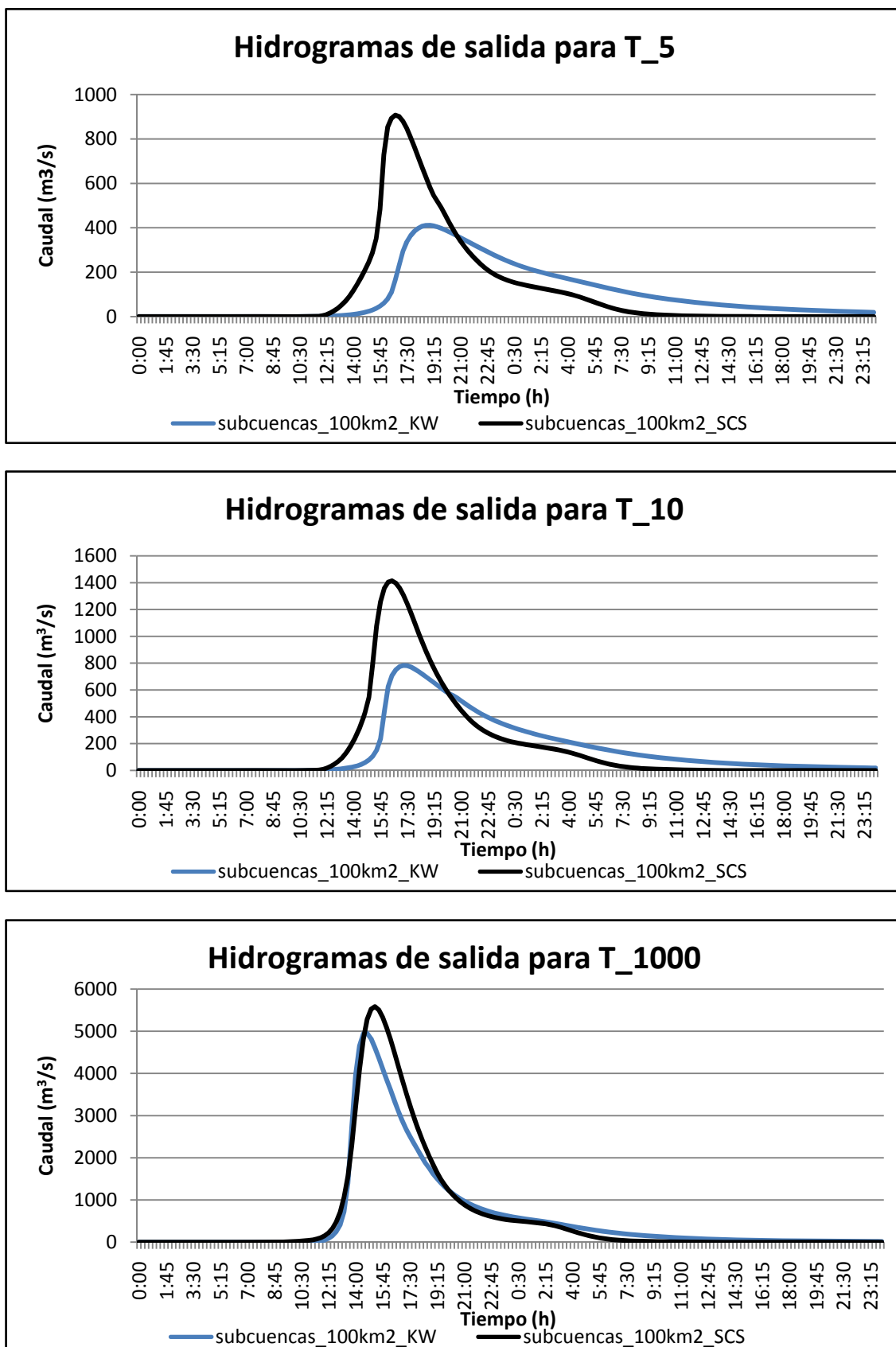


Fig. 0.13. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para los periodos de retorno de 5, 10 y 1000 años

Para observar con más precisión las diferencias entre ambos métodos se muestran las siguientes tablas:

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	907,1	1414	2663,4	3224	3788,2	4552,6	5019,2
KW	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,6
Diferencia	484,4	608,7	699,9	617	519,9	265,5	64,6
%	53,40	40,04	26,28	19,13	13,72	5,83	1,28

Tabla 0.23. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Volumen del hidrograma (mm)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	28,55	43,48	80,04	96,49	113,27	135,84	150,27
KW	27,04	41,35	76,54	92,62	108,96	131,22	144,9
Diferencia	1,51	2,13	3,5	3,87	4,31	4,62	5,37
%	5,28	4,89	4,37	4,01	3,80	3,40	3,57

Tabla 0.24. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	16:45	16:30	16:00	16:00	16:00	15:45	15:45
KW	19:00	17:15	15:45	15:15	15:00	14:45	14:45
Diferencia	135	45	-15	-45	-60	-60	-60

Tabla 0.25. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Para los tamaños de las subcuencas más grandes los datos entre ambos métodos son muy diferentes a los obtenidos con el tamaño de subcuencas más pequeñas. En este caso, para todos los periodos de retorno se observan caudales pico mayores para el método del SCS, sin embargo, para todos los periodos de retorno, el hidrograma correspondiente al método de la Onda Cinemática adelanta su pico con respecto al otro método.

De la comparación entre los dos métodos (Hidrograma Unitario del SCS y Onda Cinemática) es clara la influencia del tamaño de la subdivisión de la cuenca completa en los resultados. Para tamaños de subcuencas menores de 50 km² se ha observado cierta similitud entre los resultados de ambos métodos. Sin embargo, para las subcuencas mayores de 100 km² las diferencias aumentan. Para caudales pequeños el método de la Onda Cinemática es muy sensible a los valores del coeficiente de rugosidad "N" lo que provoca una laminación artificial de la avenida. Por tanto, para periodos de retorno pequeños en grandes superficies el método de cálculo que mejor se ajusta a los resultados es el método del SCS.

Por otro lado, el método de la Onda Cinemática es más apropiado para esta zona ya que funciona mejor en zonas con poca pendiente, como es el caso de la cuenca de la Rambla del Albuñón. Sin embargo, para aplicarlo y que los resultados sean satisfactorios se requiere tener bien caracterizada la zona de estudio, tanto desde el punto de vista cartográfico, como del punto de vista de uso del suelo (teniendo una información de usos de suelo actualizada) con el fin de poder evaluar apropiadamente el coeficiente de rugosidad “N” y el porcentaje de terreno permeable e impermeable.

1. Introducción

Los Sistemas de Información Geográfica se han convertido, gracias al desarrollo de los medios informáticos, en una potente herramienta de apoyo a la gestión y conocimiento del territorio, insospechado hace tan solo unos años.

Estos sistemas podría definirse como un conjunto de herramientas informáticas que captura, almacena, transforma, analiza, gestiona y edita datos geográficos (referenciados espacialmente a la superficie de la Tierra) con el fin de obtener información territorial para resolver problemas complejos de planificación, gestión y toma de decisiones apoyándose en la cartografía lo que ofrece numerosas ventajas respecto a la cartografía convencional.

En este estudio se ha utilizado un programa de información geográfica, como es el HEC-GeoHMS, con el fin de visualizar información de cuencas y cauces, obteniendo, a su vez, los datos necesarios a introducir en el programa de modelización hidrológica HEC-HMS.

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo implantados para hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía. Para llevar a cabo la simulación con este programa es necesario un modelo de cuenca, obtenido con HEC-GeoHMS, y un modelo meteorológico donde se indiquen los parámetros hidrológicos requeridos.

Con este estudio se pretenden obtener los hidrogramas de salida de las subcuencas para una misma cuenca en dos supuestos distintos: 1) subcuencas de gran tamaño (más de 100 km²) y 2) subcuencas con áreas inferiores a 50 km² cada una. El objetivo principal es analizar los datos de caudales obtenidos para cada caso y compararlos.

También se compararán los resultados obtenidos con dos métodos distintos de cálculo: el método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service (SCS) y el método de la Onda Cinemática para el cálculo de la transformación de la lluvia neta-escorrentía. Las pérdidas por infiltración se calcularán mediante el método del Número de Curva del SCS, mientras que para los tránsitos en cauce se utilizará el método de Muskingum-Cunge en ambos supuestos.

2. Objetivos

Los objetivos propuestos a la hora de hacer el siguiente estudio han sido:

- Realizar la validación de los datos pluviométricos de las estaciones cercanas a la zona de estudio para la obtención de la precipitación máxima diaria. Para ello se realizará el análisis de dobles masas de cada estación y se corregirán los datos que se consideren erróneos.

- Calcular la Precipitación máxima diaria mediante el ajuste de los datos validados a la función de distribución de Gumbel en cada estación. Se aplicaran los métodos de polígonos de Thiessen para la asignación de la precipitación máxima diaria a cada subcuenca.

- Realizar un análisis de sensibilidad del tamaño de las subcuencas en el estudio de avenidas. Para ello se compararán los resultados obtenidos del cálculo de avenidas mediante sistemas SIG y modelos semidistribuidos (programa HEC-GeoHMS). Para una misma cuenca en dos supuestos: 1) subcuencas de gran tamaño (más de 100 km²) y 2) subcuencas con áreas inferiores a 50 km² cada una.

- Realizar un análisis de sensibilidad del método de transformación lluvia-escorrentía en el cálculo de avenidas. Se estudiarán los dos modelos de cuenca (subcuencas de más de 100 km² y menores de 50 km²) con los métodos del Hidrograma Unitario del SCS y la Onda cinemática.

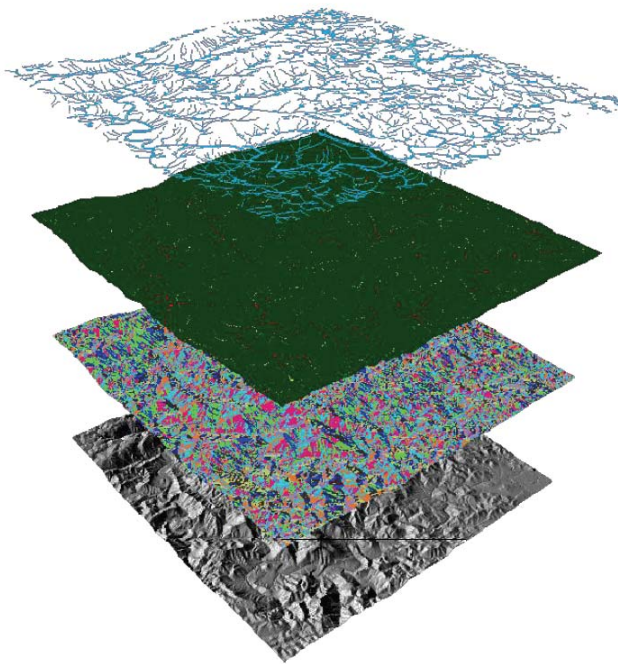
3. Obtención de las subcuencas de estudio mediante Sistemas de Información Geográfica.

Conceptos de Sistemas de Información Geográfica.

- Un *SIG* (GIS en inglés) es un sistema de información especializado en el manejo y análisis de información geográfica (geoespacial).
- La *información geográfica* es una abstracción o representación de la realidad geográfica (paisaje).
- La *geografía* es una descripción de los elementos que forman el ambiente:

Ambiente rural: topografía, hidrografía, formaciones geológicas, tipos de suelo, etc.

Ambiente humano: ciudades, edificaciones, vías de transporte, dotaciones, etc.



- *Entrada de datos de un SIG:*

Un SIG puede recibir datos de distintas maneras:

- Digitalización directa: mapas en papel o más recientemente mediante el método “heads up digitizing”, en el cual el técnico usa una foto aérea o una reproducción escaneada de un plano y digitaliza los elementos que desee en ese plano o foto.

- Entrada de coordenadas en archivos digitales: se aplica en casos diversos donde existen tablas que tienen coordenadas, tales como los que existen en agrimensura y las que se reciben directamente de aparatos GPS de diferentes fabricantes.
- Teledetección: aunque esta es una ciencia aparte, usualmente es complementaria con los SIG porque los productos que un procesamiento de imágenes suelen ser otras capas de información que pueden ser utilizadas por los SIG. Por ejemplo, un procesamiento de imágenes puede derivar índices de vegetación, humedad, y otros además de derivar mapas de cubierta de terreno. En otras ocasiones puede suceder que la imagen satelital se use como base para derivar otras capas de información en un SIG.
- *Output*: representación gráfica y cartográfica en papel y digital. Esta es una función importante pero no la primordial en un SIG.
- *Manipulación de datos*:

Debe proveer herramientas para el uso de esta información. Por ejemplo:

 - Funciones para la transformación matemática de coordenadas: proyecciones cartográficas, transformaciones geométricas, etc.
 - Reformateo: integración, generalización y depuración.
 - Importación y exportación de datos.
- El *análisis* es el componente más importante dentro de un SIG. Principalmente se trata de usar la información disponible para producir nueva información. Un SIG debe tener las siguientes funciones analíticas:
 - Selección geográfica: se basa en búsquedas simples o complejas tanto en el aspecto geográfico como en la base de datos.
 - *Ejemplo_ seleccionar todos los usos de suelo de tipo lómico y a la vez no tengan uso de suelo urbano.*
 - Proximidad: determinar qué cosas están cerca de cuáles otras basado en distancias.
 - *Ejemplo_ localizar todos los edificios que estén dentro del margen de 100 metros a lo largo de una alineación de carretera propuesta*
 - Sobreimposición cartográfica: aquí se encierran las funciones más poderosas y usualmente combina las anteriores además de añadir otras como:

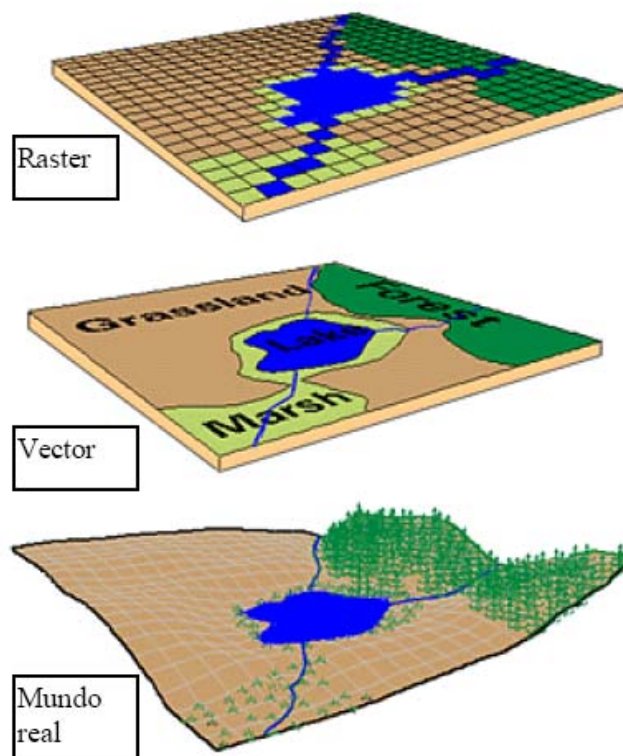
reclasificación, funciones por celda (alrededores de una celda o por zonas de celdas con igual valor dentro de un mismo layer).

- Rutas óptimas: selección de rutas con la menor distancia o resistencia posible. Puede darse en medios tales como una red de carreteras, de drenajes, tuberías, etc. En otros casos se puede derivar rutas a base de superficies como la elevación.

Tipos de datos geográficos.

1. La manera en que se guarda la información que representa los datos geográficos en un SIG tiene dos vertientes:

- *Representación vectorial*: utiliza los elementos llamados punto, línea y polígono para representar la geografía. Ejemplo de esto son los SIG vectoriales como ESRI ArcInfo.
- *Representación ráster*: Se basa en la unidad fundamental llamada celda o píxel los cuales definen toda una capa de información. Esta representación es utilizada por programas GIS como ArcInfoGRID.



2. Tipos de datos:

- *Fuentes de información:* este tema es de importancia para poder entender mejor la información que se está utilizando y poder decir cuál será la validez o confiabilidad de los datos.
 - Información primaria: es la que se recoge directamente en el lugar a ser investigado. Las encuestas, el uso de medidores de distinto tipo son ejemplos de cómo se puede generar información de lo que llamamos también “de primera mano”. Sin embargo realizar este tipo de tarea puede ser costoso y se necesita usualmente hacer muestreos ante la dificultad de realizar estudios en la totalidad de los casos.
 - Información secundaria: es aquella que utilizamos de fuentes que ya colectaron la información y que no tenemos control de cómo fue recopilada.
- *Tipos de datos:* la base de datos asociada a un SIG se compone de campos con estos tipos de datos:
 - Numéricos, como:
 - Binarios_ usados para tipos especiales de información.
 - Fechas_ un tipo especial de dato numérico.
 - Enteros_ cualquier número positivo o negativo que no incluya una fracción.
 - Reales_ incluyen los números enteros y cualquier número con fracción.
 - Texto: las cadenas de caracteres se usan para describir características nominales o cualidades de los récords en una base de datos.
 - Objetos: archivos, imágenes, etc.

Utilidad de los SIG

- *Inventarios de recursos:*
 - Catastros
 - Recursos naturales
 - Infraestructuras: eléctrica, agua, etc.
 - Arqueológicos

➤ *Planificación y reglamentación*

- Herramienta para delimitar áreas reglamentarias a base de criterios científicos

➤ *GeoMercadeo*

- Herramienta para investigaciones de mercados según la geografía censal y los datos estadísticos de encuesta, etc.

➤ *Seguridad Pública*

- Sistema 911
- Policía: análisis de patrones delictivos
- Manejo y respuesta a emergencias

➤ *Manejo de distribución de fondos*

- Programas sociales
- Educación
- Fondos de emergencia por desastres

➤ *Uso diario*: sistema de mapas en autos, los cuales muestran la ruta más eficiente para llegar de un sitio a otro.

Productos que componen ArcGIS

- ArcMap: es una aplicación para entrada de datos, búsquedas estadísticas y geográficas, además de output (mapas impresos).



- ArcCatalog: es una herramienta para organizar y documentar los datos geográficos (metadata).



- ArcToolbox: se usa para el geoprocésamiento, es decir, para combinar capas de información, manipulación de los datos, definición y transformación de sistemas de coordenadas, y otros.



La funcionalidad de ArcGIS tiene varios niveles como son:

- ArcGIS_ArcView: este nivel provee la menor funcionalidad de tipo GIS dentro de esta plataforma. Se puede usar para digitalizar, manipular capas de información, geoprocésamiento con funcionalidad limitada y creación de Geodatabases personales de limitada funcionalidad. Esta aplicación ha sido usada para la realización de este estudio. Junto con la extensión de Geo-HMS hemos podido crear el modelo de nuestra cuenca de estudio.
- ArcGIS_ArcEditor: contiene toda la funcionalidad de ArcView además de otras aplicaciones para la creación de geodatabases con definición topológica y comportamiento.
- ArcGIS_ArcInfo: posee toda la funcionalidad anterior además de toda la gama de funcionalidades de geoprocésamiento existentes en las antiguas versiones de ArcInfo: coberturas, geodatabases, shapefiles, importación y exportación de múltiples formatos, etc.

3.1. Generación del Modelo Digital de Elevación

3.1.1. Definición

Un modelo digital de elevación (MDE) puede definirse como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Según esta definición se puede comentar que las propiedades básicas de un MDT son:

-los MDT toman la forma de estructuras de datos, lo que significa que no son sólo una acumulación o listado de cifras si no que su construcción debe realizarse de acuerdo con una estructura interna.

-los MDT representan la distribución espacial de una variable, lo que acota claramente su ámbito de actuación en la modelización de fenómenos geográficos.

-finalmente, la definición indica que la variable representada en el MDT debe ser cuantitativa y de distribución continua.

Un concepto que suele confundirse con el MDE es el modelo digital del terreno (MDT), siendo éste último una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Por tanto, puede decirse que un MDE es un caso particular de MDT en el que la variable que se representa es la altitud o la elevación.

La representación de los datos en un MDE puede dividirse en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster.

En el modelo vectorial los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos definidos por sus coordenadas. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas, las líneas mediante un vector de puntos y los polígonos mediante una agrupación de líneas.

En el modelo raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que cubren el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada. Estas unidades se llaman celdas.

Cada modelo de datos puede expresarse mediante diferentes estructuras de datos:

✓ *Estructuras vectoriales*, basadas en entidades u objetos:

- Contornos: la estructura básica de un modelo de contornos es la polilínea definida como un vector de n pares de coordenadas (x,y) que describe la trayectoria de líneas de igual elevación o curvas de nivel. En el caso más sencillo, el MDE está formado por el conjunto de curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud, más un conjunto de puntos acotados que definen lugares singulares.
- Vectorial: redes de triángulos irregulares (TIN). Esta estructura se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados que se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos.

✓ *Estructuras raster*: basadas en localizaciones.

- Matrices regulares: de tamaño de celda constante. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura la localización espacial de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas.
- Matrices jerárquicas: (*quadtrees*) matrices imbricadas en una estructura jerárquica. El mayor interés de estas matrices es que solucionan el problema de las matrices regulares, es decir, su resolución espacial constante. En este tipo de matrices los elementos pueden ser datos elementales, como en las matrices regulares o matrices 2X2 con una distancia entre filas y columnas mitad de la del nivel anterior. En todo caso, la estructura final es un árbol jerárquico de matrices elementales con una profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel (*quadtrees*).

3.1.2. Fuentes de Información

En este proyecto se ha usado la información procedente de un MDE de la zona de estudio, así como de una ortofoto y del Mapa Topográfico Regional.

La disponibilidad de la ortofoto es importante para verificar la delineación de los cauces durante el proceso con HEC-GeoHMS, ya que una ortofoto es la representación de la verdad-terreno. Una ortofoto (u ortofotomapa) es un documento cartográfico que consiste en una fotografía aérea vectorial o una imagen satélite que ha sido rectificadas geométricamente. Por este motivo posee las propiedades de un mapa normal y se puede utilizar directamente para hacer mapas. Además cualquier medición hecha directamente sobre la ortofoto será planimétricamente correcta. Su utilidad más importante es que puede ser colocada debajo de datos vectoriales, como capas de SIG, para apoyar la visualización y mejorar la presentación.

Normalmente todo estudio de avenidas va seguido de un estudio hidráulico en el que se determinan las planicies de inundación, sirviendo los resultados obtenidos en el primer estudio como datos de entrada para el segundo. Para realizar un estudio hidráulico además de los valores de los caudales punta obtenidos en el estudio de avenidas se necesita conocer perfectamente las características de las secciones de los cauces y su entorno más próximo. Para obtener estos datos con suficiente precisión hay que recurrir a mapas con escalas muy grandes, del orden de 1:500, que normalmente no se encuentran disponibles o no están actualizados. Por ello en la mayoría de los casos es conveniente realizar un levantamiento topográfico de las secciones de interés. Por lo tanto, si se tiene intención de realizar un estudio hidráulico es conveniente que el levantamiento topográfico de las secciones se lleve a cabo antes de la realización del estudio de avenidas, para que así, los datos de las secciones obtenidos en campo puedan ser utilizados para la obtención del MDE.

3.1.3. Modificación del contorno de costa

En este proyecto partimos de un MDE que es un producto final muy fiable elaborado durante la toma de datos para la cartografía, por lo que cada punto ya tiene su cota, etc.

Lo único que tenemos que hacer para que este MDE se ajuste a nuestro estudio será delimitar la zona de costa que queda dentro de la zona de estudio. Para ello lo primero que debemos hacer es ajustar el MDE a nuestra cuenca con el fin de no trabajar con mucha más área de la que en realidad necesitamos.

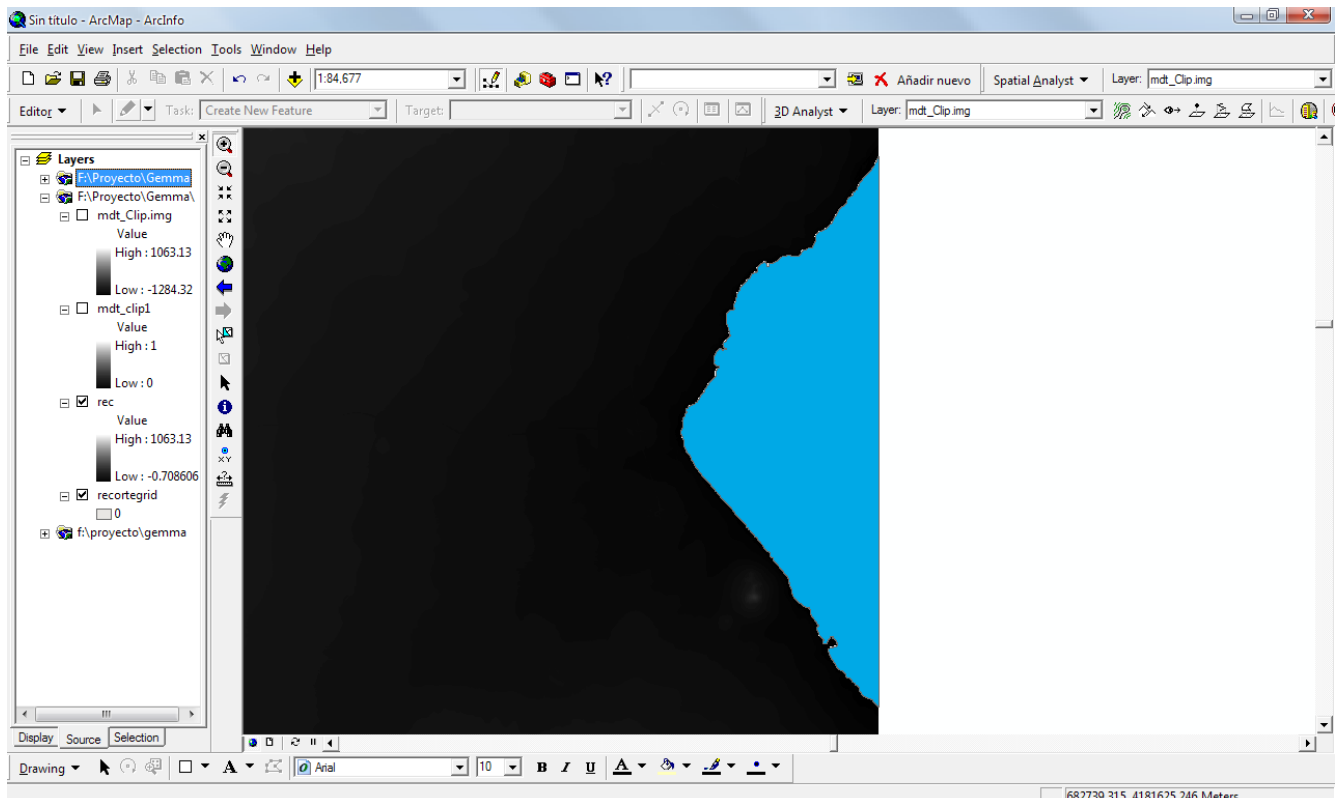


Fig.3.1. Vista del MDE con el contorno deformado.

A continuación hay que crear una máscara con el contorno original y multiplicarla por el MDE deformado. Para crear esta máscara aislamos la curva de nivel de costa (con cota cero) y creamos un polígono cerrado. Este polígono cerrado se convierte a raster con un tamaño de celda igual al que tiene el MDE con el contorno deformado. Ahora ese polígono en formato raster se reclasifica, asignándole a todas sus celdas el valor uno, y así ya se tiene la máscara.

Finalmente hay que multiplicar el MDE con el contorno deformado y la máscara creada. De este modo todas las celdas del MDE deformado que estén dentro de la máscara se multiplicarán por uno y, por lo tanto, su valor de elevación no cambiará, mientras que las celdas que caigan fuera de la máscara serán multiplicadas por cero y en consecuencia serán eliminadas.

De esta forma ya se dispone de un MDE en formato raster y con el contorno de la zona de costa perfectamente definido.

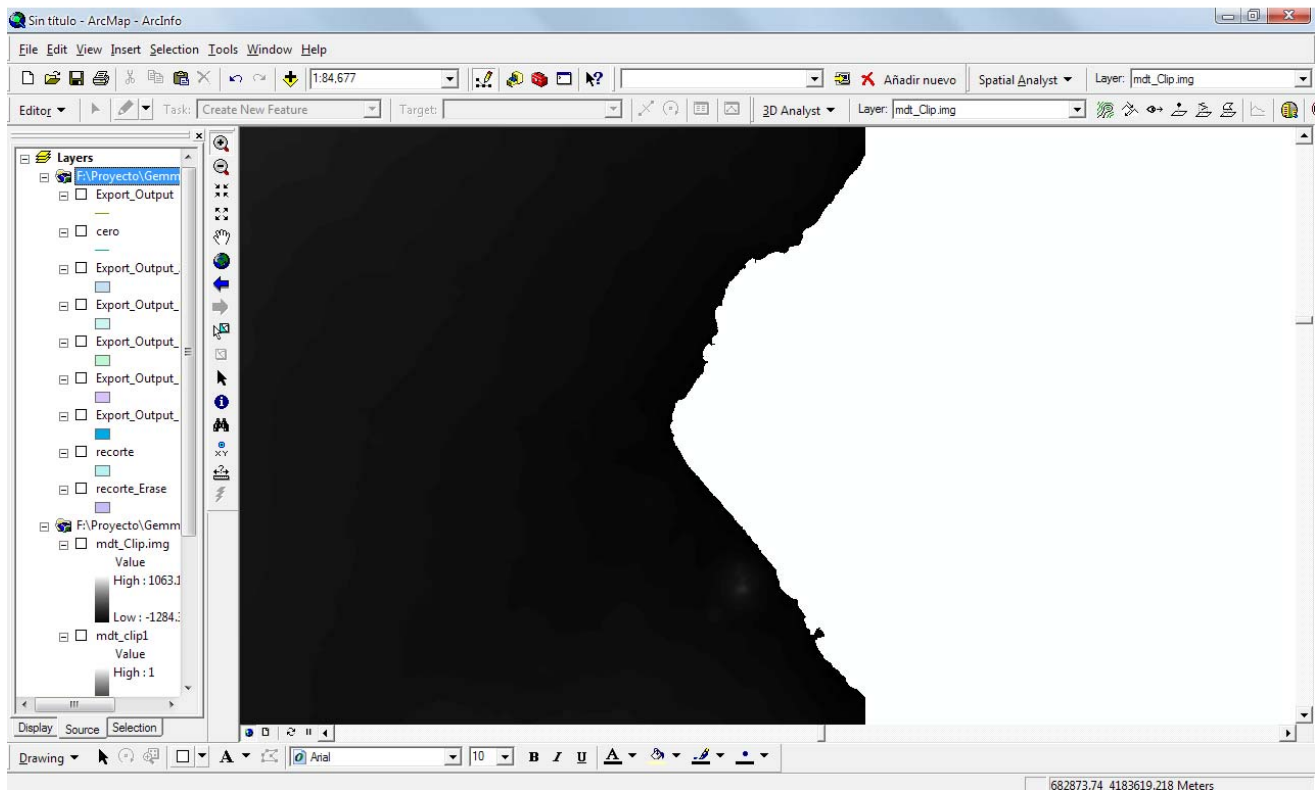


Fig.3.2. MDE con el contorno de costa corregido.

3.1.4. Verificación y errores

En un principio el proyecto se llevó a cabo con un MDE obtenido en el año 1999 y con un tamaño de celda de 10x10 metros. Durante el preprocesado del terreno para la obtención de las cuencas y cauces de estudio se apreció la falta de precisión del modelo. Con un tamaño de celda de 10x10 metros y sabiendo que el cauce de la Rambla del Albuñón tiene unos 15-20 metros de ancho es fácil que algunas partes del cauce se pierdan durante este preprocesado del terreno mediante HEC-GeoHMS.

No había más solución que la de intentar arreglar estos pequeños errores introduciendo en nuestra estructura vectorial (TIN) capas de puntos que solventaran por ejemplo, el efecto pantalla de la autovía A-30 sobre el curso normal de la rambla estudio. Para ello se creó en ArcCatalog una capa de puntos (shapes) y en ArcMap se editaron dichos puntos en el lugar correspondiente y con la elevación deseada, en este caso lo que se intentaba era eliminar la sobrelevación de la autovía sobre el terreno, dejando así la elevación que tendría el terreno de no haberse topado el modelo con la autovía. Como problemas más significativos que se encontraron se pueden destacar: el efecto pantalla de la autovía A-30 así como el de la nacional N-332, la existencia de un canal que conduce el agua de otra cuenca hacia la rambla

del Albujón, parte de la rambla de Benipila que por motivos de construcción la parte superior de dicha rambla vertía sobre la del Albujón o parte de la rambla de Miranda que el HEC-GeoHMS; por efecto de la construcción de la autovía del Mediterráneo tanto como porque la zona en cuestión es una gran llanura; hacía verter también dicha rambla sobre la del Albujón. Pero, desde luego, el error más significativo se hacía patente en el tramo final de la rambla del Albujón, es decir, en su desembocadura, donde por culpa de una zona urbanizada ésta está desviada artificialmente y el programa no era capaz de representarla fielmente.

Todos estos inconvenientes a la hora de obtener los resultados estaban intentando ser solucionados mediante capas de puntos que representaran la elevación real del terreno sin tener en cuenta las construcciones que se habían realizado en la zona. Sin embargo, al mismo tiempo, se facilitó el MDT obtenido en 2008 y con un tamaño de celda de 4x4 metros, lo que hacía presagiar que la mayoría de los problemas obtenidos con el MDE de 1999 iban a ser total o parcialmente subsanados con este nuevo modelo.

Como todo comienzo, fue difícil dar en el clavo, pero poco a poco, se fueron comprendiendo los numerosos errores que se obtenían a la hora de tratar el modelo. El gran error con el que se topó fue que ArcMap no era capaz de trabajar con tantas celdas, ya que a ser de 4x4 metros se necesitaban muchas más celdas que en el modelo de 10x10 para completar toda la zona de estudio. Este inconveniente fue resuelto mediante el uso de ArcWorkStation otra aplicación de ArcGis.

De este modo se consiguió obtener un modelo lo más exacto que hasta el momento se podría conseguir desde un punto de vista cartográfico.

3.1.5. Conclusiones

El MDT obtenido hasta ahora no será definitivo. Este modelo, como se indicó en el apartado anterior, sólo es correcto desde el punto de vista cartográfico, es decir, partiendo de un modelo vectorial de contornos se ha obtenido un modelo raster de tamaño de celda constante, siendo lo más parecido posible al modelo original. Una vez dentro de Hec-GeoHMS éste modelo será transformado para obtener un modelo correcto desde el punto de vista hidrológico.

3.2. Obtención de las características geomorfológicas de la cuenca mediante HEC-GeoHMS

3.2.1. Descripción

HEC-GeoHMS es una barra de herramientas de dominio público desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los EE.UU. en colaboración con ESRI y que funciona en Windows bajo el software ArcView 3.x de ESRI.

Esta herramienta ha sido desarrollada como un grupo de herramientas hidrológicas geoespaciales para ingenieros e hidrólogos con una limitada experiencia en SIG. El programa permite visualizar información espacial, documentar características de la cuenca, realizar análisis espaciales, delinear cuencas y ríos, construir las entradas para modelos hidrológicos y ayudar en la preparación de informes.

El objetivo de usar HEC-GeoHMS es obtener las características físicas de la cuenca hidrográfica para luego estimar los parámetros hidrológicos, que serán los datos de entrada para HEC-HMS.

El esquema de trabajo en HEC-GeoHMS es el siguiente:

- Preprocesado del terreno
- Extracción de la cuenca de estudio
- Procesado de la cuenca
- Obtención de las características de cauces y subcuencas
- Estimación de los parámetros hidrológicos
- Exportar datos a HEC-HMS

3.2.2. Algoritmo de cálculo

Todas las operaciones raster involucradas en la delineación de subcuencas están basadas en la premisa de que el agua fluye siguiendo la línea de máxima pendiente.

En un MDE de estructura raster cada celda está rodeada de ocho celdas, excepto las celdas que estén en el límite del modelo que estarán bordeadas por tres o cinco celdas. Según esto, el agua que haya en una celda puede fluir hacia una o más de estas ocho celdas adyacentes según las pendientes. Este concepto es conocido como algoritmo de flujo en ocho direcciones. Existen diversas variantes de este algoritmo pero la más simple y la que usa HEC-GeoHMS permite que el agua que haya en una celda fluya únicamente a otra celda adyacente, siguiendo la línea de máxima pendiente.

Con esta sencilla premisa se pueden obtener las líneas de flujo.

Una línea de flujo puede definirse como el trayecto que, a partir de un punto inicial, sigue la línea de máxima pendiente. Por lo tanto, una línea de flujo es una simulación simple del

proceso de escorrentía superficial que, en un MDE, sólo debería finalizar en los supuestos de alcanzar una concavidad, desembocar en el mar o llegar al borde del modelo.

Otro concepto de interés es el área subsidiaria, definida como el conjunto de elementos del MDE cuyas líneas de flujo convergen en un punto único. De esta forma una cuenca hidrográfica puede ser definida como un área subsidiaria en la que el punto que ejerce el sumidero tiene algunas características singulares. Un punto del modelo será sumidero cuando cumpla alguna de estas tres condiciones:

- El punto sea el de menor altitud de la concavidad.
- El punto se encuentre al borde del modelo y todos sus vecinos drenen a él. En este caso se trata de una cuenca que no está completamente incluida en el modelo.
- El punto esté situado en la línea de costa y drene hacia el mar. Como es el caso en este estudio.

Partiendo de un punto del modelo la línea de flujo se construye siguiendo la línea de máxima pendiente hasta llegar a un punto considerado como sumidero. El proceso de construcción de una línea de flujo a partir de un punto inicial es iterativo y consta de tres fases elementales:

1. Se fija el punto inicial de la línea.
2. Se calculan las pendientes hacia sus ocho vecinos más próximos. Pueden darse tres casos:
 - a. Todas las pendientes son negativas. Se trata de una concavidad. Fin de la línea.
 - b. Todas las pendientes son negativas y el punto está en el borde del MDE. La cuenca continúa probablemente fuera de los límites del MDE. Fin de la línea.
 - c. Se localiza al menos un punto con pendiente positiva. Se elige el punto con la pendiente máxima.
3. El punto elegido (pendiente máxima) se incorpora a la línea de flujo y se toma como base para volver al punto 2.

3.2.3. Preprocesado del terreno

El primer paso en el uso de HEC-GeoHMS es el preprocesado del terreno. En este paso el MDE es usado como dato de entrada para obtener ocho conjuntos de datos que describe el drenaje de la cuenca y permiten la delineación de las subcuencas y la red de drenaje.

Los cinco primeros archivos son en formato “grid” (valores celda a celda o raster):

1. Dirección del flujo (Flow direction)
2. Acumulación del flujo (Flow accumulation)
3. Definición de cauce (Stream definition)
4. Segmentación de cauce (Stream segmentation)
5. Delineación de subcuencas (Watershed delineation)

Los dos siguientes corresponden a la representación vectorial de las subcuencas y de los cauces respectivamente:

6. Elaboración de las subcuencas (Watershed polygons)
7. Elaboración de los tramos de cauce (Stream segments)

El último archivo es usado para mejorar el rendimiento de la posterior delineación de subcuencas en el procesado de cuenca:

8. Agregación de subcuencas (Aggregated watershed)

Una vez abierto ArcView hay que cargar la extensión de HEC-GeoHMS. Para ello hay que ir al menú File>Extensions y seleccionar HEC-GeoHMS.

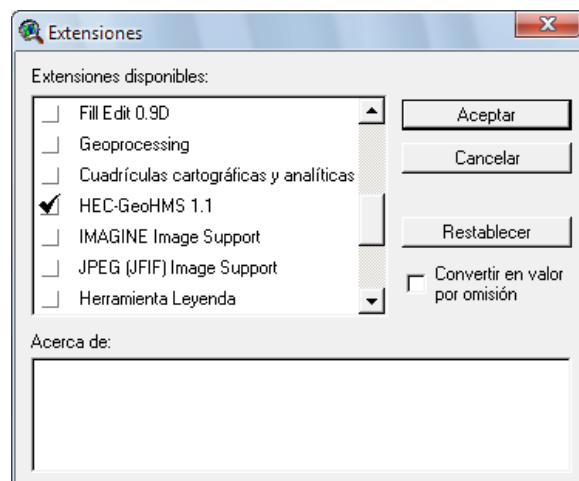


Fig.3.3. Vista de la opción donde se añade la extensión de HEC-GeoHMS.

Una vez cargada la extensión aparecerán dos nuevos tipos de documentos: MainView y ProjView.

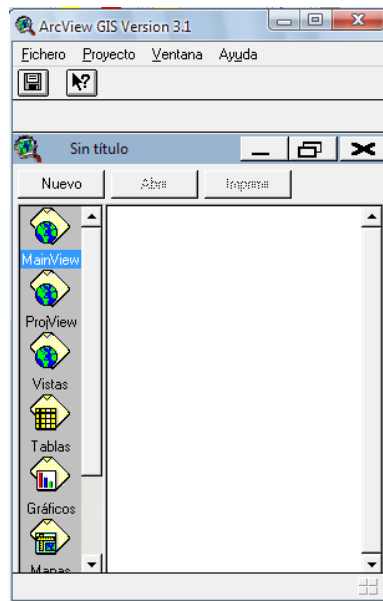


Fig.3.4. Vista de ArcView una vez cargada la extensión de HEC-GeoHMS

La extensión HEC-GeoHMS incorpora al programa ArcView una serie de menús: “Terrain preprocessing”, “HMS Project Setup” y “Utility”, además de botones y herramientas que se muestran a continuación.

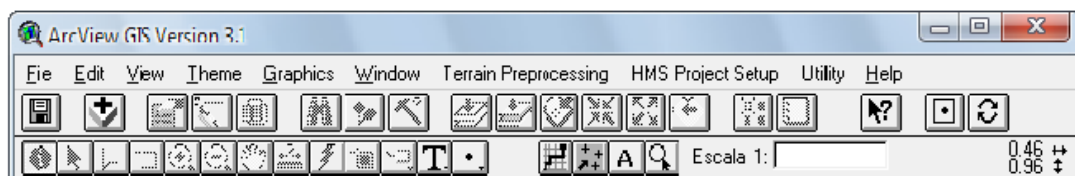


Fig.3.5. Vista de los nuevos menús y botones en “MainView”

Por último tenemos que añadir el MDE e indicar la unidades del modelo y las unidades de distancia en el menú View > Properties.

Ahora ya se puede proceder a realizar el preprocesado del terreno, comenzando con el menú “Terrain Preprocessing”.

Terrain Preprocessing
Data Management
Terrain Reconditioning
Fill Sinks
Flow Direction
Flow Accumulation
Stream Definition
Stream Segmentation
Watershed Delineation
Watershed Polygon Processing
Stream Segment Processing
Watershed Aggregation
Full Preprocessing Setup

Fig.3.6. Vista del menú "Terrain Preprocessing"

A continuación se describe cada uno de los comandos del menú.

3.2.3.1. Data Management (Gestión de datos)

HEC-GeoHMS gestiona todos los archivos que son introducidos u obtenidos asignándole una función determinada a cada uno. Por ejemplo, cuando se añade un MDE al programa éste considera que es el MDE "primitivo". Después, cuando se realiza el llenado de huecos, el programa considera que el MDE obtenido es el MDE hidrológicamente correcto. Y así sucesivamente va asignando una función a todos los archivos obtenidos.

3.2.3.2. Fill Sinks (Llenado de huecos)

A la hora de trazar las líneas de flujo hay que considerar la posibilidad de que el flujo se pudiese acumular en alguna depresión en el interior del MDE, y que la red resultante no se desarrollase hasta el límite del modelo. Una depresión en un MDE se define como la celda o conjunto de celdas rodeadas por otras celdas con una elevación mayor, pudiendo ser debida a errores de los datos o ser atributos naturales de paisaje. Esto podría ocurrir por dos motivos:

- Que la depresión donde desembocan todas las líneas de flujo esté realmente en el terreno, como un lago sin salida o un mar interior.
- Que esa depresión sea artificial, debida a los algoritmos de interpolación usados para obtener el MDE en formato raster a partir de fuentes de información en formato vectorial.

El método de llenado de depresiones usado en HEC-GeoHMS consiste en completar las depresiones incrementando los valores de las celdas en cada depresión hasta el valor de la celda con la elevación más baja en el límite de la depresión. Así es como se obtiene un DE idealizado sin depresiones, en el que se garantiza la continuidad de la red hidrográfica.

En el caso de que las depresiones se encontraran realmente en el terreno habría que obtener una máscara de depresiones mediante la resta entre el MDE original y el MDE idealizado.

Luego con esta máscara se determinaría el volumen la profundidad de las depresiones, y si se considerase oportuno, habría que caracterizarlas para luego modelizarlas en HEC-HMS como embalses.

3.2.3.3. Flow Direction (Dirección de Flujo)

Es el primer archivo derivado del MDE sin depresiones. En este paso se le asigna a cada celda un valor en función de la dirección hacia donde drena, que será la dirección de la máxima pendiente. Los ocho valores posibles en función de la dirección de drenaje son: 1 este, 2 sureste, 4 sur, 8 suroeste, 16 oeste, 32 noroeste, 64 norte y 128 noreste. Este esquema de numeración se debe al sistema binario, que es el usado por los ordenadores donde el 1 equivale a 00000001, el 2 a 00000010, el 4 a 00000100 y así sucesivamente hasta el 128 que equivale a 10000000.

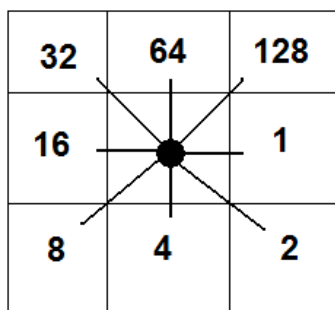


Fig.3.7. Direcciones de flujo para el modelo de ocho direcciones de flujo.

3.2.3.4. Flow Accumulation (Acumulación de Flujo)

A partir del archivo de direcciones de flujo se obtiene el archivo de acumulación de flujo. Este paso determina el número de celdas que drenan a cada celda. Hay que indicar que la celda de estudio no está contabilizada en el proceso.

Desde el punto de vista físico, la acumulación de flujo es una medida del área de drenaje, expresada en unidades de celdas, que puede ser pasada a m^2 o km^2 multiplicando el número de celdas por el tamaño de celda del modelo.

3.2.3.5. Stream Definition (Definición de Cauce)

A partir del archivo de acumulación de flujo los cauces pueden ser definidos mediante el uso de un valor umbral de área de drenaje o de número de celdas de acumulación del flujo. Desde el punto de vista hidrológico, este valor umbral indica el momento en el que se genera la escorrentía.

Todas las celdas que tengan un valor superior al valor umbral asignado por el usuario serán clasificadas como celdas que forman parte del cauce, mientras que las restantes celdas serán consideradas como superficie del terreno que drena a los cauces definidos. En el archivo raster resultante todas las celdas que sean consideradas como cauce tendrán el valor 1, mientras que a las demás se le asigna el valor "NO DATA".

Cualquier valor puede ser usado como valor umbral. HEC-GeoHMS da por defecto como valor umbral el 1% del valor máximo de la acumulación de flujo, esto es, el área de la cuenca de estudio, por lo tanto, el valor umbral definido sería el 1% del área total. Pero el momento en el que se genera a escorrentía no depende únicamente del tamaño de la cuenca.

La generación de escorrentía desde áreas naturales es un proceso complejo, ya que involucra iteraciones entre la topografía, nivel freático, duración e intensidad de la precipitación y características de la infiltración influenciadas por el suelo y la vegetación.

En zonas áridas y semiáridas las contribuciones que realizan a la escorrentía en cauce tanto el flujo por saturación, el flujo subsuperficial poco profundo, así como el flujo subterráneo, no son significativas. Esta situación se ve propiciada por la escasez de precipitaciones y la baja densidad de la cobertura vegetal.

En la mayoría de las tormentas las capacidades de infiltración son inferiores a las intensidades de precipitación, por lo que el flujo Hortoniano se convierte en el principal proceso que interviene en la generación de escorrentía.

El flujo Hortoniano o flujo en ladera, se genera cuando la tasa de precipitación supera la tasa de infiltración durante un episodio lluvioso. Comienza cuando se alcanza el tiempo de encharcamiento (tiempo desde el comienzo de la precipitación hasta que la escorrentía comienza) y una vez que el almacenamiento en depresión es completado. Durante una tormenta la intensidad de la precipitación varía y por ello el flujo Hortoniano puede comenzar, cesar y volver a comenzar otra vez.

El flujo en ladera Hortoniano se genera en áreas con pobre vegetación, principalmente en regiones semiáridas, áreas sujetas a intensidades de precipitación elevadas, suelos arcillosos o poco profundos y en áreas urbanas. Normalmente no se presenta en áreas forestadas o terrenos con pastos, debido a sus altas capacidades de infiltración.

Existen otros algoritmos de cálculo que consideran para definir los cauces distintas combinaciones entre área, pendiente y longitud de flujo. Algunos de ellos están implementados en una barra de herramientas denominada TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models), desarrollada por la Universidad de Utah y que funciona bajo ArcGIS, cuya función es similar a la del menú "Terrain Preprocessing" de HEC-GeoHMS, pero que contempla algoritmos más complejos para el establecimiento de las direcciones de flujo y para la obtención de los cauces.

Como algoritmos para obtener los cauces, aparte del valor umbral de área aportante que está implementado en HEC-GeoHMS, hay que destacar el valor umbral de área y pendiente y el valor umbral de área y longitud:

- Umbral Área-Pendiente: Se considera que hay cauce cuando $A \cdot S_y > C$, donde A es el área contribuyente y S es la pendiente del área contribuyente. En este algoritmo se considera que el coeficiente "y" tiene un valor de 2 y que el valor de C es 200.

- Umbral Área-Longitud: Se considera que hay cauce cuando $A > M \cdot L_y$, donde A es el área contribuyente y L es la máxima longitud de flujo hacia aguas arriba de la celda considerada. Este método está basado en la ley de Hack. Esta ley establece una relación empírica entre la longitud de cauce y el área de la cuenca: $L = A^{1/y}$. Para la mayoría de las cuencas el coeficiente “y” tiene un valor próximo a 1.7. El parámetro que el usuario debe elegir para la obtención de los cauces es M, del que no se han encontrado recomendaciones en la bibliografía, al tratarse de un método todavía en fase de experimentación.

Ya que se trata de algoritmos complejos en los que la combinación de parámetros es de difícil estimación y que no están implementados en HEC-GeoHMS, se ha optado por usar el valor umbral de área contribuyente.

A falta de mayor información, se propone utilizar como valor umbral de área contribuyente el valor umbral usado con el National Elevation Dataset, que es de 5000 celdas. Para hallar el valor que se utilizará en este estudio hay que tener en cuenta que el valor de celda del MDE es de 4x4 metros, por lo que el valor umbral buscado será:

$$5000 \times 4 \times 4 = 80000\text{m}^2$$

Una vez hecha la prueba con un valor umbral de 80000m² se ha decidido tomar un valor superior ya que las cuencas resultantes en el proceso son excesivamente pequeñas y el programa no es capaz de crear los cauces ya que el límite son 500 cauces y con este valor umbral el número de cauces es superior. Por tanto, después de probar con distintos valores se ha optado por realizar el proceso con un valor umbral de 2000000m².

3.2.3.6. Verificación de la delineación de cauces

En este punto es donde hay que decidir si el MDE con el que se está trabajando es adecuado, y por lo tanto se puede seguir trabajando con él hasta el final del proceso, o si por el contrario requiere ciertas modificaciones o si hay que desecharlo por completo.

Lo que se comprueba es si los cauces obtenidos por el algoritmo de cálculo discurren en realidad por donde el programa indica. La mejor forma de comprobarlo es poner debajo de la capa de los cauces una ortofoto de la zona de estudio. Si se comprueba que la red definida no se aproxima lo suficiente a la red real habrá que modificar el MDE.

Este proceso de modificación está compuesto de dos partes: la primera es realizar un reacondicionamiento del terreno con HEC-GeoHMS y la segunda es modificar los datos de partida para obtener un nuevo MDE. Hay que tener en cuenta que el proceso de modificación es un proceso iterativo y que el usuario deberá elegir el valor de los parámetros a modificar y decidirá cuando el resultado es aceptable en base a su experiencia y a la comprobación “in situ” de las zonas conflictivas.

3.2.3.7. Reacondicionamiento del terreno

Esta primera parte de la modificación del MDE se realiza en HEC-GeoHMS, en el menú “Terrain Reconditioning”. Para realizar este paso es necesario disponer de la red de drenaje del terreno en formato shpefile. Si no se dispone de ella pero se tiene una ortofoto de la zona de estudio se puede crear un shapefile de líneas y dibujar lo cauces sobre la ortofoto. De esta forma se dispondrá de la red real.

Lo que se consigue con el reacondicionamiento del terreno es modificar los datos de elevación del MDE para hacerlos más consistentes con la red de drenaje. Esto implica asumir que la información de la red de drenaje es más fiable que la información cartográfica usada para obtener el MDE. Normalmente ambas informaciones tendrán la misma fiabilidad, excepto en las zonas urbanas, donde las curvas de nivel quedan cortadas por las edificaciones, y por lo tanto, los datos de elevación del MDE no serán muy fiables.

El algoritmo usado para realizar el reacondicionamiento del terreno se conoce como “AGREE”. Este algoritmo lo que hace es modificar la elevación de la celda por donde pasa el cauce por una cierta cantidad definida por el usuario. Después se modifica la elevación de una cantidad de celdas que forman parte de la sección transversal, para crear una transición gradual de la sección desde la orilla hasta el fondo del cauce. Por lo tanto se necesita definir tres parámetros:

Vector buffer (cells): número de celdas alrededor del vector que define el centro del cauce en que se realizará el reacondicionamiento.

Smooth drop/raise: número de unidades que será modificada la elevación de la celda que define el centro del cauce. Si el número es positivo se bajará el cauce, si es negativo se elevará.

Sharp drop/raise: número de unidades adicionales en que será modificada únicamente la elevación de la celda del centro del cauce.

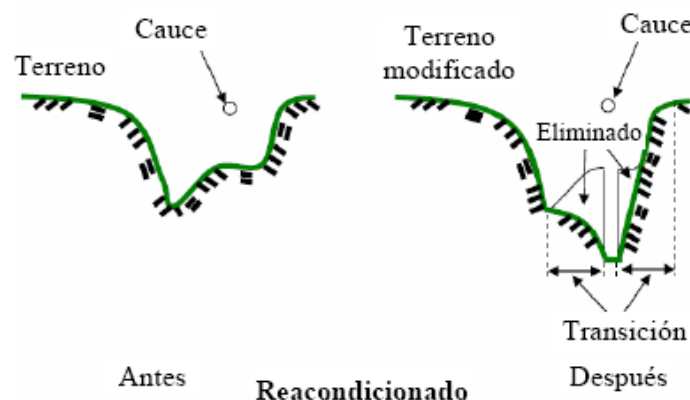


Fig.3.8. Sección transversal antes y después del reacondicionamiento.

Una vez realizado el reacondicionamiento se obtendrá un nuevo MDE en formato raster, con el que nuevamente se realizará el proceso de llenado de huecos, direcciones de flujo, acumulación de flujo y verificación de los cauces con la ortofoto. El reacondicionamiento es un proceso en el que el usuario debe elegir los parámetros de forma iterativa, considerando los resultados anteriores en un proceso de prueba y error.

3.2.3.8. Modificación de los datos de partida

Si después de realizar un cierto número de reacondicionamientos el usuario considera que la red de drenaje no es suficientemente parecida a la red de drenaje real los datos de partida para obtener el MDE deben ser modificados, por lo que habrá que desechar el MDE “primitivo” y todos los archivos obtenidos a partir de este. La modificación puede consistir en eliminar puntos que hacen de barrera e impiden al flujo drenar por su camino real, o al contrario, crear puntos que formen una barrera artificial para evitar que la red de drenaje se desvíe de su trazado real. Este proceso, al igual que el reacondicionamiento es un proceso iterativo.


3.2.3.9. Finalización del preprocesado de la cuenca

El preprocesado de la cuenca finaliza realizando los siguientes pasos:

- *Stream Segmentation (Segmentación del cauce)*. En este paso se divide el cauce en distintos tramos. Cada tramo de cauce está formado por el punto de inicio de un cauce y una unión, por dos uniones o por una unión y el punto final del cauce. Entonces a todas las celdas que formen parte de un mismo tramo se les asignará el mismo número.
- *Watershed Delineation (Delineación de Subcuenca)*. Este paso delinea la subcuenca que vierte a cada tramo de cauce definido en el paso anterior.
- *Watershed Polygon Processing (Elaboración de las Subcuencas)*. Este paso convierte el archivo en formato raster de las subcuencas obtenidas en el paso anterior a un archivo en formato vectorial.
- *Stream Segment Processing (Elaboración de los tramos de cauce)*. Este paso convierte el archivo en formato raster de los cauces a un archivo en formato vectorial.
- *Watershed Aggregation (Agregación de Subcuenca)*. Este paso agrega las subcuencas hacia aguas arriba en cada confluencia de los cauces. Aunque no tiene ningún significado hidrológico es un paso necesario, ya que mejora el proceso posterior de delineación de subcuencas y mejora la extracción de los datos.

3.2.4. Extracción de la cuenca de estudio

Una vez que se ha completado el preprocesado del terreno hay que extraer la cuenca hidrográfica de estudio. Para ello hay que definir el punto de drenaje de la cuenca. Esto se realiza con el menú “HMS Project Setup” en “MainView”.


Primero se selecciona “Star New Project”. El programa solicitará un nombre para el nuevo proyecto que se va a crear. Después de dar el nombre hay que seleccionar el botón *especificar punto de salida*  y hacer clic sobre el punto de salida de la cuenca. Seguidamente se selecciona el comando “Generate Project” y se indica “Original Stream Definition”. De esta forma el nuevo proyecto se va a generar en base al valor umbral indicado para la definición de cauces. También se puede generar un nuevo proyecto en base a otro valor umbral seleccionado “A new threshold”.

Una vez que la extracción de la cuenca de estudio es realizada los datos aparecen en la ventana “ProjView”, donde desaparecen los menús usados y aparecen nuevos menús y botones. Es, en esta ventana, en la que se realizará el proceso hidrológico, consistente en el procesamiento de cuenca, la obtención de las características físicas de cauces y subcuencas, la estimación de los parámetros hidrológicos y la exportación de los datos a HEC-HMS.


3.2.5. Procesado de cuenca

Las herramientas que aparecen en el menú “Basin Processing” permiten combinar o dividir subcuencas de forma iterativa, así como delinear subcuencas a partir de un punto determinado.

✓ Basin Merge (Unión de Subcuencas)

Con esta herramienta se pueden unir varias subcuencas previamente seleccionadas con el botón de selección . La unión se realiza de forma interactiva presentando el resultado de la unión con una línea roja exterior, permitiendo al usuario examinar el resultado y aceptar o cancelar la operación. Para que dos o más subcuencas puedan unirse deben tener un punto confluencia común o ser adyacentes en forma de aguas arriba hacia aguas abajo, es decir, que una subcuenca pueda verter en otra.

✓ Basin Subdivision (Subdivisión de Subcuencas)



Para dividir una subcuenca hay que usar el botón . Esta división se puede realizar de tres maneras:


- División de una subcuenca sobre un cauce existente
- División de una subcuenca sin cauce existente
- División de una subcuenca sobre un tributario

✓ River Merge (Unión de Cauces)

Cuando dos o más subcuencas son unidas en una sola, es necesario combinar los tramos de cauce de las subcuencas unidas para indicar que ahora pertenecen a una misma subcuenca.

✓ River Profile (Perfil del Cauce)

Esta herramienta proporciona información sobre la pendiente de un tramo de cauce seleccionado, que puede ser usada para la división de subcuencas. El perfil del cauce es creado mediante los valores de elevación extraídos del MDE a lo largo del cauce. El perfil se puede obtener de dos formas: teniendo la capa *River.Shp* seleccionada se pulsa en el botón de selección , se seleccionan uno o varios cauces continuos y se elige "River Profile" en el menú "Basin Processing", o teniendo activada la capa *River.Shp* se pulsa en el botón de obtener perfil  y luego se elige el tramo o tramos de cauce.

Una vez que se obtiene el perfil se puede dividirla subcuenca en el punto en el que se produzca un cambio importante en la pendiente. Para ello hay que seleccionar el botón de dividir el perfil  cuando el gráfico del perfil del cauce esté activo y hacer clic en el punto aproximado donde se produce el cambio de pendiente. Entonces aparecerá la pantalla principal con la división de la subcuenca y se preguntará al usuario si acepta o no la división. Si se acepta la división el programa pedirá dar un nombre al punto de división creado.

3.2.6. Características de Cauces y Subcuencas

HEC-GeoHMS permite la extracción de varias características físicas de los cauces y de las subcuencas. Estas características son almacenadas en tablas de atributos, que pueden ser exportadas a hojas de cálculo o a otros programas. A partir de las características físicas se obtendrán posteriormente los parámetros hidrológicos, que forman parte de los datos que conforman el modelo hidrológico. La obtención de las características físicas se realiza en el menú "Basin Characteristics".

En las dos tablas siguientes se recogen las características físicas más importantes, para los cauces y para las subcuencas, y el encabezado asociado a cada una en la tabla de atributos. La capa donde se almacenan los datos de los cauces se llama *River.Shp* y la capa donde se almacenan los datos de las subcuencas *WaterShd.Shp*.

Característica física	Encabezado en tabla de atributos
Longitud	Riv_Length
Altitud del inicio del tramo	us_Elv
Altitud del final del tramo	ds_Elv
Pendiente del tramo	Slp_Endpt

Tabla 3.1. Características físicas de los cauces. Capa "River.Shp".

Característica física	Encabezado en tabla de atributos
Área	Area
Máxima longitud de flujo	Longest_FL
Máxima altitud	USElv
Mínima altitud	DSElv
Pendiente de Longest_FL	Slp_EndPt

Tabla 3.2. Características físicas de las subcuencas. Capa "Watershed.Shp".

A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de los comandos del menú "Basin Characteristics".

✓ *River Length (Longitud del Cauce)*

Con este paso se obtiene la longitud de todos los cauces y se almacena en la tabla de atributos del archivo de cauces, con el encabezado Riv_Length.

✓ *River Slope (Pendiente del Cauce)*

Este paso extrae las elevaciones de los puntos de inicio y fin de cada tramo de cauce y con la longitud obtenida en el apartado anterior calcula la pendiente. Los datos de elevación y pendiente se guardan en la tabla de atributos de los cauces, bajo los encabezados "us_Elv", "ds_Elv" y Slp_Endpt".

Una vez seleccionado *River Slope* hay que indicar las unidades verticales del MDE, que normalmente serán metros.

✓ *Basin Centroid (Centroide de Subcuenca)*

El cálculo del centroide de una subcuenca a partir del cálculo de los momentos respecto a los ejes X e Y no está implementado porque el centroide podría quedar fuera de la subcuenca de estudio y caer sobre otra. Por este motivo HEC-GeoHMS implementa cuatro métodos aproximados para la obtención del centroide de cada subcuenca:

- Bounding Box*. Este método rodea la subcuenca con un rectángulo y asigna como centroide de la subcuenca el centro del rectángulo. Es un método muy rápido pero no es aplicable a la mayoría de las subcuencas.
- Ellipse Method*. A diferencia del anterior, este método rodea la subcuenca con una elipse y coloca el centroide en el centro de la elipse. Es algo más lento pero generalmente produce resultados más satisfactorios.
- Flow Path*. Este método calcula la máxima longitud de flujo en una subcuenca y coloca el centroide en su punto medio.

- d. *User-Specifies Centroid Location*. Cuando los tres métodos anteriores no producen resultados satisfactorios el usuario puede colocar el centroide en cualquier punto de la subcuenca.

Hay que indicar que realmente el centroide de la cuenca no es una característica que tenga una aplicación directa en la modelización hidrológica. En HEC-GeoHMS es necesario calcularlo para poder situar posteriormente los elementos hidrológicos que forman el modelo de cuenca en HEC-HMS.

✓ *Longest Flow Path (Máximo Camino de Flujo)*

Este paso calcula una serie de características físicas de la cuenca, como son la máxima longitud de flujo, la elevación aguas arriba, la elevación aguas abajo, la pendiente entre ambos puntos y la pendiente entre el 10% y el 85% de la máxima longitud de flujo. Se genera un nuevo archivo llamado "Longestfp.Shp", en cuya representación gráfica aparece el máximo recorrido del agua en cada subcuenca. Todas las características calculadas son almacenadas también en las tablas de atributos de "Longestfp.Shp" y de "Watershed.Shp". De todas las características obtenidas las más importantes son la máxima longitud de flujo que está bajo el encabezado "Longest_FL", y la pendiente de la máxima longitud de flujo, que está bajo el encabezado "Slp_EndPt". Es con estas dos características con las que posteriormente se determinará el tiempo de concentración de cada subcuenca, parámetro de entrada necesario para HEC-HMS.

✓ *Centroidal Flow Path (Camino de Flujo desde el Centroide)*

Este paso calcula la longitud que recorre el flujo en una subcuenca desde la proyección del centroide de la subcuenca sobre el máximo camino recorrido por el flujo hasta el punto de salida de la subcuenca.

3.2.7. Estimación de los parámetros hidrológicos

Cuando las características físicas de los cauces y de las subcuencas han sido extraídas hay que calcular los parámetros hidrológicos. Este cálculo se puede hacer de dos formas: mediante una hoja de cálculo o mediante el menú "Hydrologic Parameters" de HEC-GeoHMS. Este menú está preparado para utilizar datos y fórmulas americanas, por lo que es más conveniente utilizar una hoja de cálculo para hallar los parámetros hidrológicos.

Los parámetros a determinar son el tiempo de concentración de cada subcuenca y su Número de Curva.

3.2.7.1. *Tiempo de concentración (Tc)*

El tiempo de concentración es utilizado para caracterizar la respuesta de una cuenca ante episodios aislados de lluvia. Se pueden encontrar diferentes definiciones de este concepto:

- Tiempo que requiere una gota de agua para desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida.

- Tiempo de equilibrio, al cabo del cual se estabiliza el caudal en el punto de salida de la cuenca, bajo precipitación uniforme.
- Tiempo transcurrido entre el final de la lluvia neta y el punto de inflexión de la curva de descenso del hidrograma correspondiente.

Para poder obtener el tiempo de concentración de una cuenca es necesario recurrir al empleo de fórmulas empíricas. Algunas de estas fórmulas son:

- a. *Fórmula de Kirpich*. Esta fórmula fue calibrada en base a datos registrados en siete cuencas rurales de Tennessee, en Estados Unidos. Las cuencas consideradas presentaban una superficie inferior a 50 hectáreas ($0,5 \text{ km}^2$), cauces bien definidos y pendientes empinadas (del 3 al 10%). Su expresión en unidades del Sistema Internacional es la siguiente:

$$t_c = 0,019 \frac{L^{0,77}}{J^{0,388}} \quad (3.1)$$

Donde:

t_c : tiempo de concentración, en minutos.

L : longitud desde aguas arriba hasta la salida en metros.

J : pendiente de la cuenca en m/m.

- b. *Fórmula de Témez*. En la publicación del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo “Cálculo Hidrometeorológico de Pequeñas Cuencas Naturales” de 1978, J.R. Témez propuso una fórmula de cálculo del tiempo de concentración, de amplia difusión en España, que se incluye en la normativa 5.2-IC de drenaje superficial, y cuya expresión es la siguiente:

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{0,28}} \right)^{0,76} \quad (3.2)$$

Donde:

t_c : tiempo de concentración, en horas.

L : longitud máxima del flujo en km.

J : pendiente del tramo en m/m.

Esta fórmula está basada en la establecida por el U.S. Corps of Engineers para el tiempo de demora expresado en la fórmula siguiente:

$$t_g = 0,126 \left(\frac{L}{V} \right)^{0,76} \quad (3.3)$$

siendo t_g : el tiempo de demora, en horas.

El tiempo de demora se puede definir como la diferencia existente entre el tiempo correspondiente al centro de gravedad del hietograma de precipitación neta y el correspondiente al centro de gravedad del hidrograma que produce. El análisis de la información recogida en varias cuencas americanas y españolas permitió establecer una relación entre ambos tiempos del orden de 0,45, dando finalmente como resultado la fórmula de Témez.

En este estudio se ha utilizado la fórmula de Témez ya que es la única que ha tenido una cierta calibración en España y es la más usada en el territorio nacional, estando sus resultados ampliamente aceptados.

3.2.7.2. Número de Curva

El número de curva es un parámetro que sirve para estimar la infiltración del terreno. Depende del tipo de suelo, del uso y tratamiento del mismo, de su condición de humedad antecedente y de la pendiente. La infiltración estimada con el método del mismo nombre será descontada de la precipitación de cálculo para así obtener la precipitación neta o efectiva, estimándose a partir de ésta la escorrentía superficial.

3.2.8. Exportar datos a HEC-HMS

El objetivo último de HEC-GeoHMS es obtener una serie de datos hidrológicos que formarán parte de los datos de entrada para HEC-HMS.

Como los parámetros hidrológicos serán calculados externamente y el modelo meteorológico también se calculará externamente, únicamente se exportará el modelo de cuenca con el área de las subcuencas y el mapa de fondo con los cauces y subcuencas.

Las herramientas que están en el menú “HMS” permiten nombrar automáticamente los cauces y las subcuencas, comprobar si hay errores en la conectividad entre cauces y subcuencas y producir el esquema del modelo de cuenca para HEC-HMS.

✓ Reach AutoName (Autonombrado de los Cauces)

Este proceso nombra los cauces en una secuencia desde aguas arriba hacia aguas abajo. El nombre de cada cauce combina la letra “R” (reach) con un número. Por ejemplo, el tramo de aguas arriba empieza con R10 y luego R20, R30, R40 y así sucesivamente hacia aguas abajo. Los nombres se almacenan en la tabla de atributos de la capa “River.Shp”, en la columna “Name”.

El usuario puede cambiar estos nombres dados por defecto. Para ello basta con iniciar una edición y modificar los valores en la tabla atributos.

✓ Basin AutoName (Autonombrado de las Subcuencas)

Este proceso nombra las subcuencas de forma similar a como se nombran los cauces, con la variación de que en este caso la letra “R” se sustituye por una “W” (del inglés Watershed). El nombre de cada subcuenca estará en la columna “Name” de la tabla de atributos de la capa “WaterShd.Shp” y de igual forma que con los cauces se puede cambiar su nombre.

✓ Map to HMS Units (Unidades del mapa a HMS)

Este paso convierte las características físicas de los cauces y subcuencas, expresadas en unidades de mapa a unidades de HMS. Las unidades de mapa son las unidades de los datos de terreno, que normalmente son metros. El usuario tiene la opción de convertir las unidades del mapa a unidades inglesas o a unidades del Sistema Internacional para trabajar en HMS. El proceso de conversión de unidades añadirá tres columnas en la tabla de atributos de “River.Shp” (“Riv_Length_HMS”, “us_Elv_HMS” y “ds_Elv_HMS”) y seis en la tabla de atributos de “WaterShd.Shp” (“LongestFL_HMS”, “CentroidalFL_HMS”, “Elevation_HMS”, “USElv_HMS”, “DSElv_HMS” y “Area_HMS”). En el caso de estar trabajando en metros los valores no cambiarán, simplemente se generarán nuevas columnas cuyo encabezado acabará en “_HMS” y que serán los datos que luego van a ser importados a HEC-HMS.

✓ HMS Data Check (Comprobación de datos de HMS)

Este paso lo que hace es verificar la consistencia y la conectividad de la estructura hidrológica del modelo. El programa comprueba que los cauces, las subcuencas y los puntos de salida tienen nombre únicos. Además confirma que los cauces y los centroides están dentro de su subcuenca correspondiente y que los cauces están conectados con puntos característicos del modelo hidrológico. Este proceso de verificación genera un archivo llamado “SkelConsChk.txt”. Este archivo debe ser revisado por el usuario para ver posibles errores, ya que el programa no indica por sí solo los errores, únicamente señala que se ha creado el fichero de verificación.

✓ HEC-HMS Basin Schematic (Esquema de cuenca de HEC-HMS)

El esquema de cuenca de HMS es la representación SIG del modelo hidrológico de cuenca, con los elementos de la cuenca y su conectividad. Este paso crea un shapefile de puntos “HMSPoint.shp” que contiene puntos característicos como el centroide de la subcuenca, los puntos de unión de cauces y el punto de salida; y otro shapefile de líneas “HMSConnect.shp” que contiene las líneas que unen las subcuencas.

✓ HMS Legend (Leyenda de HMS)

Este paso implementa al modelo la simbología de HEC-HMS para representar los puntos y líneas características como elementos hidrológicos. Hay dos opciones: “HMS Legend” o “Regular Legend”.

✓ Add Coordinates (Añadir Coordenadas)

Este paso asigna coordenadas geográficas a los elementos hidrológicos en las tablas de atributos de "HMSPoint.shp" y "HMSConnect.shp". Con esto se asegura que la información geográfica no se pierda.

✓ Background Map (Mapa de Fondo)

Este paso captura la información geográfica de los límites de las subcuencas de los cauces en un fichero de texto ASCII que puede ser utilizado como mapa de fondo en HEC-HMS.

✓ Lumped Basin Model (Modelo de Cuenca Agregado)

Este paso captura los elementos hidrológicos, su conectividad e información geográfica en un archivo de texto ASCII que puede ser leído por HMS. Este archivo sólo puede ser utilizado para modelos agregados.

4. Cálculo de la precipitación máxima diaria

Se conserva la expresión tradicional incorporándole únicamente el factor K, denominado de uniformidad.

$$Q = \frac{CxIx A}{3,6} x K \quad (4.1)$$

Siendo:

Q (m³/s)=caudal punta correspondiente a un periodo de retorno dado

I (mm/h)= máxima intensidad media en el intervalo de duración t_c, para el mismo periodo de retorno

A (km²)= superficie de la cuenca

C = coeficiente de escorrentía

K = coeficiente de uniformidad

Tanto para el cálculo de la intensidad I como el coeficiente C de la fórmula 1, se necesita conocer el valor de la máxima precipitación diaria P_d (mm) correspondiente al periodo de retorno de cálculo.

En principio la estimación se debería hacer a partir de los planos de isoyetas de máximas precipitaciones diarias (isomáximas) trazadas de acuerdo con valores de las lluvias puntuales de un mismo periodo de retorno en las diversas estaciones pluviométricas y cuya utilización se indicará más adelante.

El valor medio areal en una cuenca así deducido debe afectarse de un factor reductor función de su área según la expresión:

$$K_A = 1 \quad \text{para } A < 1\text{km}^2$$
$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15} \quad \text{para } 1 \leq A \leq 3000\text{km}^2 \quad (4.2)$$

Siendo:

K_A = factor de la lluvia diaria

Log A = logaritmo decimal de la superficie A en km²

La aplicación de este factor se justifica por la no simultaneidad de las precipitaciones de un mismo periodo de retorno en todos los puntos de la cuenca y ha sido deducida a partir de los valores empíricos obtenidos en cuencas de diverso tamaño y localización donde se ha determinado la lluvia media del día más desfavorable en cada uno de los años con datos de registro.

Para poder realizar los cálculos anteriormente expuestos para la obtención de los caudales de referencia a la salida de una cuenca un dato básico son las lluvias máximas previsibles en un día, y para ello se pueden optar por dos vías:

1. Usando la publicación del Ministerio de Fomento “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.
2. Usando directamente los datos de una estación pluviométrica cercana a la zona de estudio y aplicando una función de distribución adecuada.

4.1. Análisis de los datos de las estaciones pluviométricas

Para poder comenzar con el cálculo de los parámetros hidrológicos se ha tenido que recoger información de la precipitación caída sobre la zona.

En este estudio se trabajará con datos de precipitaciones máximas anuales en 24 horas, facilitados por el AEMet (Agencia Estatal de Meteorología).

En una primera aproximación se pidieron datos de todas las estaciones pluviométricas situadas dentro de la cuenca de estudio, como son:

<u>Ind</u>	<u>Nombre</u>
7020	Murcia (Corvera)
7023	Fuente Álamo C.H.
7023 A	Fuente Álamo S.E. Agraria
7024	Valladolises
7024 J	Fuente Álamo (Balsapintada)
7025	Murcia (Los Martínez del Puerto)
7026	Cartagena (Pozo Estrecho)
7026 U	Torre-Pacheco C.C.A.

Tabla 4.1. Identificación de las estaciones situadas dentro de la zona de estudio

Analizando estos datos se decidió ampliar la información tomando también datos de estaciones situadas alrededor de la cuenca objeto. Estas estaciones, cuyos datos fueron facilitados por el AEMet, son:

<u>Ind</u>	<u>Nombre</u>
7005	Mazarrón
7011	Cartagena H.E.
7014	Cartagena Esc. Bastarache
7016	Cartagena (El Algar)
7028	Los Alcázares Aeródromo
7028I	Torre-Pacheco (Torreblanca)
7227	Alhama (Comarza)
7229	Murcia El Sequen
7229A	Murcia (El Valle)
7013	Cartagena Puerto

Tabla 4.2. Identificación de las estaciones colindantes a la zona de estudio

En la siguiente imagen se aprecia la situación de dichas estaciones con respecto a la cuenca del Albuñón:

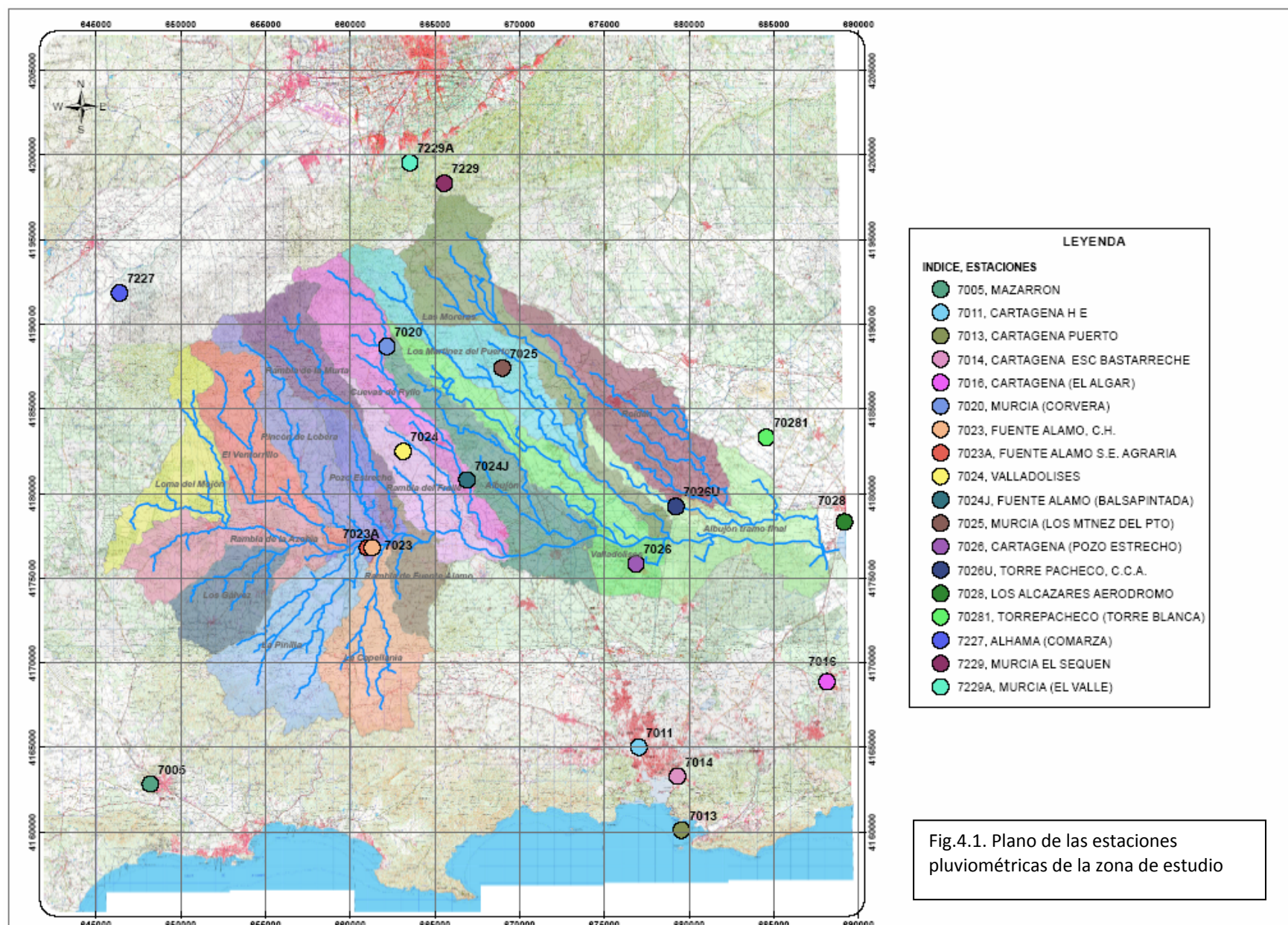


Fig.4.1. Plano de las estaciones pluviométricas de la zona de estudio

En el estudio de los datos se ha tenido en cuenta tanto la distribución temporal como la distribución espacial, comparando los datos de aquellas estaciones que estuvieran próximas en tiempo y en espacio. La comparación de los datos se ha realizado mediante el método de las dobles Masas, donde se realizará un análisis de la consistencia de las series con la finalidad de verificar que las condiciones de medida de los datos no han variado a lo largo del tiempo (ni en condiciones del aparato registrador, ni en el procedimiento de observación, ni en el emplazamiento de la estación). Se empleará el método de las dobles masas (MDM), o curva de doble acumuladas o doble acumulación.

Para su aplicación, se realizará una gráfica en la que se representa en un eje de coordenadas la suma acumulada de “n” estaciones, y en el otro eje la suma acumulada de las precipitaciones en la estación cuyos datos se quiere comprobar su continuidad u homogeneidad.

Si los puntos dibujados se localizan sobre una línea recta, significa que la estación tiene una estadística homogénea y las estadísticas estarán sujetas a un coeficiente de proporcionalidad que es la tangente de esa recta.

Si se produce un cambio en la pendiente de la curva es que ha ocurrido un cambio en la constante de proporcionalidad y, por tanto, la estadística no es homogénea y habrá que corregir.

La anomalía de la no homogeneidad de los datos se puede deber a diversas causas:

- Por un cambio de sitio en la estación
- Por un error sistemático en las estaciones
- Algún error en el cálculo de las precipitaciones.

Para definir mejor la comparación, las acumulaciones de una de las variables se comparará con la acumulación de un grupo de variables afines o patrón, que estará menos afectada por los errores que puedan existir en algunas de las variables del grupo. Este patrón se calcula para cada caso como la media aritmética de los que forma el grupo.

Para la definición de estos grupos afines se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Los grupos o patrones deben de tener de 3 a 10 estaciones
- Cada grupo debe de tener al menos una estación con una serie de años suficientemente extensa, por lo menos 10 años
- La media de las estaciones debe ser similar en cada grupo
- La altura de las estaciones del grupo no deben de tener diferencia mayor de 300m
- Las estaciones deben estar relativamente próximas, no más de 50km

Los grupos propuestos para el análisis contienen las siguientes estaciones:

- Grupo 1: Alhama (Comarza), Murcia (El Valle), Murcia El Sequen, Murcia (Corvera) y Murcia (Los Martínez del Puerto)
- Grupo 2: Valladolides, Fuente Álamo (Balsapintada), Fuente Álamo S.E.Agraria, Fuente Álamo C.H. y Mazarrón
- Grupo 3: Cartagena H.E., Cartagena Esc. Bastarache, Cartagena (El Algar) y Cartagena Puerto, Torre-Pacheco (Torreblanca), Torre-Pacheco C.C.A., Cartagena (Pozo Estrecho) y Los Alcázares Aeródromo.

4.2. Ajuste según la función de Gumbel

Con las estaciones pluviométricas descritas anteriormente se puede obtener la precipitación total diaria correspondiente a cada periodo de retorno aplicando una función de distribución. Se asume la hipótesis de que se trata de una muestra de una población que se distribuye según una ley teórica de distribución de valores extremos.

Una de las funciones de distribución clásica que proporciona resultados adecuados es la función de distribución de Gumbel, cuya función de distribución corresponde a las máximas extraídas de una distribución normal. Esta función de distribución $F(x)$ es :

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (4.3)$$

Donde: $F(x)$ es la función de densidad, es decir, la probabilidad de no superar el valor de x . Siendo x la variable que representa la precipitación máxima diaria y viene medida en mm/h. La variable y (variable de Gumbel) es:

$$Y = \alpha (x - x_0) \quad (4.4)$$

Según la teoría de la probabilidad:

$$G(x) = 1 - F(x) \quad (4.5)$$

Donde: $G(x)$ representa la probabilidad del suceso complementario, es decir, la probabilidad de superar la magnitud x .
Según la función de periodo de retorno T se tiene:

$$1/T = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (4.6)$$

o bien tomando logaritmos naturales dos veces:

$$y = -\ln \cdot \ln (T/(T-1)) \quad (4.7)$$

En el método de Gumbel el valor de la variable x , estimada para un periodo T , se obtiene según la expresión:

$$x = \bar{x} + K \cdot S \quad (4.8)$$

siendo:

\bar{x} : media de los valores x_y conocidos

S : desviación típica de estos valores

El valor de k se obtiene de la fórmula de la variable de Gumbel

$$y = y_n + K \sigma_n \quad (4.9)$$

Donde y , σ_n , son funciones de la longitud de la muestra n (ver tabla 4.3.)

n	y	σ_n	n	y	σ_n
8	0,4843	0,9043	50	0,5485	1,1607
10	0,4952	0,9497	52	0,5493	1,1638
12	0,5035	0,9833	54	0,5501	1,1667
14	0,51	1,0095	56	0,5508	1,1696
16	0,5157	1,0316	58	0,5515	1,1721
18	0,5202	1,0493	60	0,5521	1,1647
20	0,5236	1,0628	62	0,5527	1,177
22	0,5268	1,0754	64	0,5533	1,1793
24	0,5296	1,0864	66	0,5538	1,1814
26	0,532	1,0961	68	0,5543	1,1834
28	0,5343	1,1047	70	0,5548	1,1854
30	0,5362	1,1124	80	0,5569	1,1938
32	0,538	1,1193	90	0,5586	1,2007
34	0,5396	1,1255	100	0,56	1,2065
36	0,541	1,1313	150	0,5646	1,2253
38	0,5424	1,1363	200	0,5672	1,236
40	0,5436	1,1413	300	0,5699	1,2479
42	0,5448	1,1458	400	0,5714	1,2545
44	0,5458	1,1499	500	0,5724	1,2588
46	0,5468	1,1538	750	0,5738	1,2651
48	0,5477	1,1574	1000	0,5745	1,2685

Tabla 4.3. Valore de y , σ_n en función de n

La metodología a seguir sería la siguiente:

- Se parte de una serie de caudales máximos anuales x_y con un número total n y se calcula su media \bar{x} y su desviación típica S.
- El valor extremo viene dado por:

$$x = \bar{x} + K \cdot S \quad (4.10)$$

donde K es función de la variable y de Gumbel

- El valor de K se obtiene de :

$$y = y_n + K \cdot \sigma_n \quad (4.11)$$

siendo y_n y σ_n función de la longitud de la muestra n por lo que:

$$K = y - y_n / \sigma_n \quad (4.12)$$

Sustituyendo en la función 4.8. queda:

$$x = \bar{x} + [(y - y_n) / \sigma_n] S \quad (4.13)$$

- Por otra parte la distribución de Gumbel es :

$$y = - \ln \cdot \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \quad (4.14)$$

$$x = \bar{x} - \frac{\ln \cdot \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) + y_n}{\sigma_n} \cdot S \quad (4.15)$$

Esta fórmula permite, supuesto un periodo de retorno T (o una probabilidad P: calcular $T = 1/p$) el calcular el caudal x para ese periodo de retorno, ya que tanto \bar{x} , como S se obtienen de los valores de \bar{x} , y_n y σ_n son función de la longitud de la muestra(n) y directamente obtenidos de la tabla 4.3.

Por otra parte se podría resolver el problema contrario dado un caudal x determinar su periodo de retorno T.

4.3. Máximas lluvias diarias en la España Peninsular

Las máximas lluvias diarias en la España Peninsular constituyen un método operativo, que de una manera breve y fiable, sirve de base de partida para el cálculo de los caudales de avenida.

El método opta por un enfoque regional que trata de reducir la varianza de los parámetros con una única muestra, empleando la información de estaciones con similar comportamiento, frente a anteriores trabajos a escala nacional en que se empleaban exclusivamente los datos locales en cada una de las distintas estaciones pluviométricas.

El enfoque tradicional de estos métodos asume la existencia de una región homogénea respecto a ciertas características estadísticas, lo que permite aprovechar el conjunto de información disponible en dicha región.

Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

El método regional adoptado, denominado tradicionalmente “índice de avenida”, asume que la variable Y resultante de dividir en cada estación los valores máximos anuales por su media

$$Y = P / \bar{P} \quad (4.17)$$

sigue idéntica distribución de frecuencias en toda la región considerada. Los parámetros de dicha distribución, una vez seleccionado el modelo de ajuste, son obtenidos a partir del conjunto de datos de las estaciones de la región, mientras que el valor local de la media \bar{P} se estima exclusivamente a partir de los datos de cada una de las estaciones.

La estimación de los cuantiles locales en un determinado punto se reduce a reescalar los cuantiles regionales Y_t con la media local \bar{P} según la siguiente expresión:

$$X = Y \times \bar{P} \quad (4.16)$$

✓ Estimación regional de cuantiles

La primera etapa de la estimación regional de cuantiles ha consistido en agrupar 1545 estaciones básicas, con 30 o más años de registro, en 26 regiones geográficas (figura 4.2.).

Las regiones han sido definidas tratando de agrupar zonas del territorio con características meteorológicas comunes y analizando de forma complementaria los coeficientes de variación muestrales C_v . Posteriormente la homogeneidad de las regiones ha sido contrastada mediante un test estadístico de X^2 .

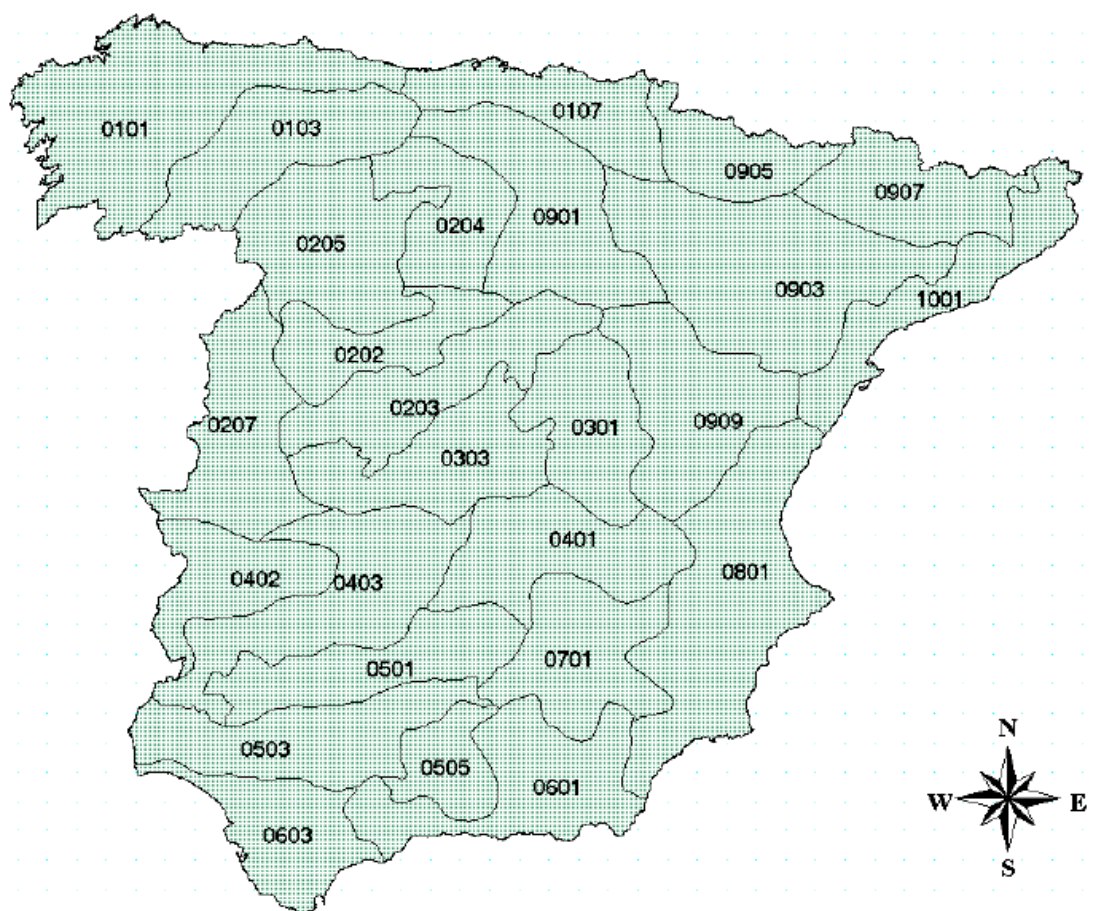


Fig.4.2. División de la España Peninsular en 26 regiones con características meteorológicas comunes.

En la segunda etapa han realizado la estimación regional de los parámetros y cuantiles de los siguientes cuatro modelos de función de distribución cuya formulación puede verse en el cuadro 4:

- a) Valores Extremos Generalizados (GEV)
- b) Log-Pearson III (LP3)
- c) Valores Extremos con dos Componentes (TCEV)
- d) SQRT-ET max

<u>Distribución</u>	<u>f(x) ó F(x)</u>	<u>Parámetros</u>
GEV	$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \right\}$	u, α, k
LP3	$f(x) = \frac{\left(\frac{\log_{10} x - u}{\alpha} \right)^{k-1}}{x \alpha \Gamma(k)} \exp \left\{ - \left(\frac{\log_{10} x - u}{\alpha} \right) \right\}$	u, α, k
TCEV	$F(x) = \exp (-\alpha_1 e^{-x/\theta_1} - \alpha_2 e^{-x/\theta_2})$	$\alpha_j, \theta_j, j = 1, 2$
SQRT-ET max	$F(x) = \exp [-k (1 + \sqrt{\alpha x}) \exp(-\sqrt{\alpha x})]$	α, k

Fig.4.3. Funciones de distribución seleccionadas

Un análisis de los cuantiles regionales Y_t estimados, con los cuatro modelos de ley seleccionados en las 26 zonas adoptadas, muestran diferencias prácticamente inexistentes para bajos y medios períodos de retorno (2, 5, 10 y 25 años), y sólo cuando los períodos de retorno son mayores, existen ligeras diferencias siempre inferiores al 8% para 500 años.

Este hecho, reduce en cierto modo la trascendencia del proceso de selección del modelo de ley, siendo la ley SQRT-ET max la finalmente seleccionada por las siguientes razones:

- Es el único de los modelos analizados de la ley de distribución, que ha sido propuesto específicamente para la modelación estadística de máximas lluvias diarias.
- Está formulada con sólo dos parámetros, lo que conlleva una completa definición de los cuantiles en función exclusivamente del coeficiente de variación con lo que se consigue una mayor facilidad de presentación de resultados.
- Por la propia definición de la ley proporciona resultados más conservadores que la tradicional ley de Gumbel.
- Conduce a valores más conservadores que los otros modelos de ley analizados para las 17 regiones con cuantiles menores, mostrando unos resultados similares en el resto de las regiones.
- Demuestra una buena capacidad para reproducir las propiedades estadísticas observadas en los datos, lo que ha sido comprobado mediante técnicas de simulación de Montecarlo.

El enfoque tradicional de los métodos regionales permite estimar el valor de los cuantiles regionales en un punto simplemente asignándole los valores obtenidos en la región en la que dicho punto está incluido, lo que presenta como principales inconvenientes tanto la incertidumbre existente respecto a los límites considerados en las regiones, como la indeseable discontinuidad que presentan los resultados en dichos límites. Para resolver estos problemas, se optó por presentar los resultados en forma “suavizada” trazando un mapa nacional de Isolíneas del coeficiente de variación (C_v) que se muestra en la figura 4.4.

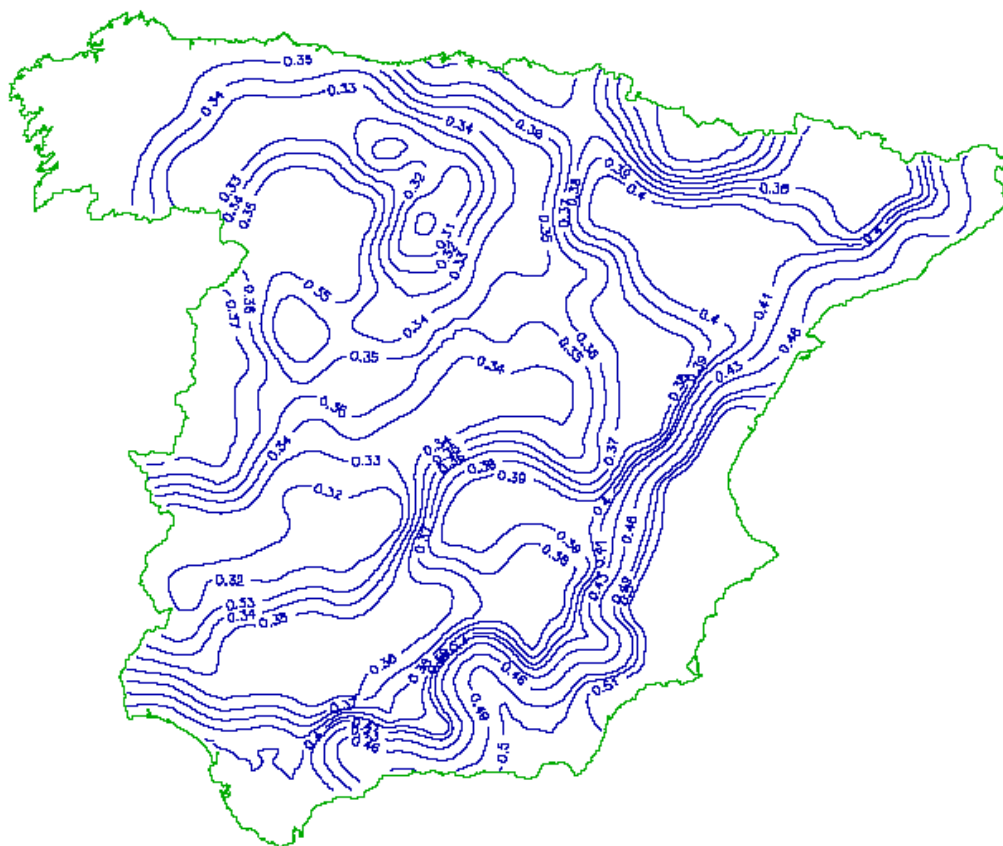


Fig.4.4. Isolíneas del valor regional del coeficiente de variación Cv.

El Cv fue seleccionado como parámetro básico debido a su fácil comprensión al estar directamente relacionado con el valor de los cuantiles debido al modelo de ley y al método de estimación de parámetros adoptados.

✓ *Distribución espacial del valor medio como factor de escala local*

La estimación de cuantiles en un determinado punto es el resultado de aplicar la fórmula 9, en la que la media P de las series analizadas actúa como factor local.

El análisis de la distribución espacial de P ha sido abordado mediante interpolación espacial con técnicas de krigado a partir de los valores medios de las series de 2231 estaciones, que incluyen las 1545 “básicas”, ya empleadas en la modelación estadísticas y otras 686 “complementarias” con series de más de 20 años.

La técnica del krigado presenta como ventaja fundamental, frente a otros métodos de interpolación (como la inversa de la distancia elevada a un exponente), la posibilidad de aprovechar directamente la información sobre correlación espacial existente en los propios datos, que queda reflejada en el denominado variograma muestral.

Para la aplicación del krigeado han considerado 15 zonas geográficas con similar comportamiento de la variable analizada, caracterizado fundamentalmente por unas variaciones “bruscas” en zonas montañosas y “suaves” en el resto. En dichas zonas han calculado los variogramas muestrales y han ajustado variogramas teóricos.

✓ *Metodología de trabajo para la estimación de cuantiles de Máximas Lluvias
diarias en la España Peninsular*

La propia publicación describe la metodología a emplear para la obtención de resultados prácticos en el cálculo de cuantiles de lluvias para diferentes períodos de retorno, en puntos de la España peninsular.

El cálculo de cuantiles se plantea aquí mediante la utilización de dos métodos:

- A partir de mapas, incluidos en el anejo 1 (del documento), en los que se representan, para la España peninsular, los valores del coeficiente de variación C_v y del valor medio P .
- Mediante la utilización de un programa informático que se incluye también en el documento “Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular”

En el anejo 1 del de dicha publicación se incluyen una serie de mapas en los que se representan tanto las Isolíneas del coeficiente de variación C_v como las del valor medio P de la máxima precipitación diaria anual.

El proceso operativo de obtención de los cuantiles para distintos períodos de retorno a partir de estos mapas es el siguiente:

- 1) Localización en los planos del punto geográfico deseado.
- 2) Estimación mediante las Isolíneas representadas del coeficiente de variación C_v y del valor medio P de la máxima precipitación diaria anual.
- 3) Para el período de retorno deseado T y el valor de C_v , obtención del cuantil regional Y_t mediante el uso del figura 4.5.
- 4) Realizar (según se recoge en la fórmula 4.16.) el producto del cuantil regional Y_t por el valor medio P obteniéndose X_t es decir, el cuantil local buscado.

C_v	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.915	2.220	2.556	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.610	2.052	2.403	2.785	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.625	2.068	2.434	2.815	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Fig.4.5. Valores de C_v para distintos periodos de retorno

4.4. Precipitación máxima para cada subcuenca

Para determinar la precipitación máxima de cada subcuenca se aplicará el método de los polígonos de Thiessen.

4.4.1. Método de los polígonos de Thiessen

El método de Thiessen trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos. Las estaciones se colocan en un mapa y se dibujan líneas que las conecten unas con otras. Las mediatrices o perpendiculares bisectrices de estas líneas, forman polígonos alrededor de cada estación. Los lados de cada polígono son los límites del área efectiva que se considera para cada estación. El área de cada polígono se determina utilizando un planímetro y se expresa como un porcentaje del área total. El promedio ponderado de lluvias para el área total se calcula multiplicando la precipitación en cada estación por su porcentaje de áreas asignado y sumando estos valores parciales. Los resultados son por lo general más exactos que aquellos obtenidos por un simple promedio aritmético. La mayor limitación del método de Thiessen es su poca flexibilidad, puesto que se requiere de un nuevo diagrama cada vez que hay un cambio en la red. El método tampoco tiene en cuenta influencias orográficas. En realidad, el procedimiento de Thiessen simplemente supone una variación lineal de la precipitación entre las estaciones y asigna un segmento de área a la estación más cercana.

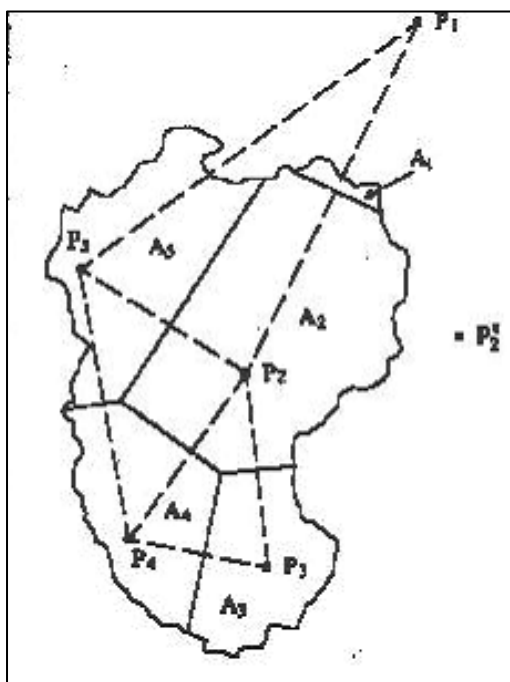


Fig.4.6. Método de Thiessen

5. Obtención de los caudales punta mediante HEC-HMS

5.1. Descripción

HEC-HMS es un programa desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los EE.UU. y sirve para simular procesos de transformación lluvia-caudal y de propagación de caudales, en cuencas naturales y urbanas. Permite modelización tanto agregada como distribuida así como simulación continua y de eventos.

Un proyecto de HEC-HMS está compuesto básicamente por cuatro bloques:

Modelo de cuenca → La representación física de la cuenca se realiza mediante el modelo de cuenca. El modelo de cuenca está construido mediante la conexión de una serie de elementos hidrológicos, de modo que formen una red que refleje el movimiento real del agua en la cuenca. El proceso de cálculo se realiza desde los elementos situados aguas arriba hacia aguas abajo. La mayoría de los elementos hidrológicos requieren parámetros para que el programa pueda modelar el proceso hidrológico representado por el elemento. Los tres elementos fundamentales son: subcuenca, tramo de tránsito y confluencia.

- En el elemento subcuenca hay implementados varios modelos matemáticos para describir los tres procesos físicos que se producen en él, que son: pérdidas de precipitación por infiltración, transformación del exceso de precipitación en escorrentía a través de un cauce y hasta un único punto de salida y aportes de flujo base.
- En el elemento tramo de tránsito el proceso a modelizar es el movimiento de una onda a través de un cauce, que está sujeto a dos procesos: traslación y atenuación. La traslación es el movimiento hacia aguas abajo de la onda sin cambiar su forma. La atenuación cambia la forma del hidrograma reduciendo su pico y extendiendo el tiempo base a medida que la onda se desplaza.
- Una confluencia lo que hace es sumar dos o más caudales entrantes para dar un único caudal de salida, sin atenuación ni traslación.

Modelo meteorológico → El análisis de los datos meteorológicos es realizado a través del modelo meteorológico, que incluye los datos de precipitación, evapotranspiración y derretimiento nival. Con el modelo meteorológico lo que se hace es asignar el valor de precipitación que le corresponde a cada subcuenca y como se distribuye en el tiempo, descontando las pérdidas por evapotranspiración y añadiendo los posibles aportes procedentes del derretimiento nival.

Especificaciones de control → Las especificaciones de control incluyen las horas de inicio y fin de la simulación, así como el intervalo temporal de cálculo.

Resultados de la simulación → Para crear una simulación hay que combinar un modelo de cuenca, un modelo meteorológico y unas especificaciones de control. Los resultados de la simulación pueden verse tanto para la cuenca completa como para un elemento particular, y en formato tabla o en formato gráfico.

5.2. Métodos de cálculo elegido

Los métodos de cálculo elegidos en este estudio son:

- Método del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS) para las pérdidas por infiltración.
- Hidrograma Unitario del SCS para el proceso de transformación lluvia-caudal.
- Onda Cinemática para el proceso de transformación lluvia-caudal, como método alternativo al método del SCS.
- Método de Muskingum-Cunge para los tránsitos en cauce.

Los aportes por flujo base no se consideran ya que en las zonas de estudio no se dan. Tampoco se consideran las pérdidas por evapotranspiración, ya que la modelización de avenidas es un proceso de tipo evento, cuya duración es de unas pocas horas, o a lo sumo dos o tres días, siendo por tanto despreciables las posibles pérdidas ocasionadas por la evapotranspiración en tan corto espacio de tiempo.

Respecto al modelo meteorológico no se han usado los patrones de distribución de precipitación que lleva implementados el programa, sino que se han creado los hietogramas de precipitación externamente.

5.2.1. Método del Número de Curva del SCS

El método del Número de Curva (CN) es una teoría semiempírica desarrollada por el SCS para estimar la infiltración.

Este método considera todas las pérdidas netas menos la evaporación real. Para tormentas simples se cumple la siguiente relación: el escurrimiento real “Q” es al escurrimiento potencial “P” como el déficit real “P-Q” es al déficit potencial “S”.

Matemáticamente:

$$\frac{Q}{P} = \frac{P - Q}{S} \quad (5.1)$$

Si se despeja “Q”:

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (5.2)$$

Introduciendo una retención inicial denominada “Ia”:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia - S} \quad (5.3)$$

La expresión anterior es válida si se cumple que “ $P \geq Ia$ ” y “ $S \geq Ia + F$ ”, siendo “F” el volumen infiltrado. La retención inicial “Ia” incluye la intercepción por la cobertura vegetal, el almacenamiento superficial y la infiltración. Empíricamente “ $Ia \approx 20\%S$ ”. Reemplazando este valor de “Ia” en la ecuación anterior se obtiene finalmente:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (5.4)$$

El parámetro “S” se expresa en función del Número de Curva (CN), mediante la siguiente ecuación:

$$S = 25,4 \cdot \frac{1000}{CN} - 10 \quad (5.5)$$

El parámetro “S” varía desde 0 hasta un valor indefinido, por ello se expresa en función del Número de Curva, ya que este valor en cambio varía entre 0 y 100.

El parámetro del Número de Curva, que se encuentra tabulado, y se explica como se obtiene en el apartado 5.3.

5.2.2. Hidrograma Unitario del SCS

El método del Hidrograma Unitario del SCS fue originalmente desarrollado a partir de datos caudal de descarga para un tiempo cualquiera es función del caudal pico y del tiempo al pico de hidrograma producido. El caudal pico es a su vez función del tiempo al pico y del área de la cuenca. Por lo tanto es el tiempo al pico el parámetro que define el hidrograma.

El tiempo al pico en este hidrograma se define como la suma de la mitad de la duración de la precipitación efectiva y un tiempo denominado *tiempo lag o de retraso*. Conceptualmente este tiempo de retraso se define como la distancia entre el centro de gravedad de la precipitación neta y el pico del hidrograma producido. Este tiempo es el que hay que introducir en el programa, y empíricamente se asume que es igual al 60% del tiempo de concentración de la cuenca, expresado en minutos.

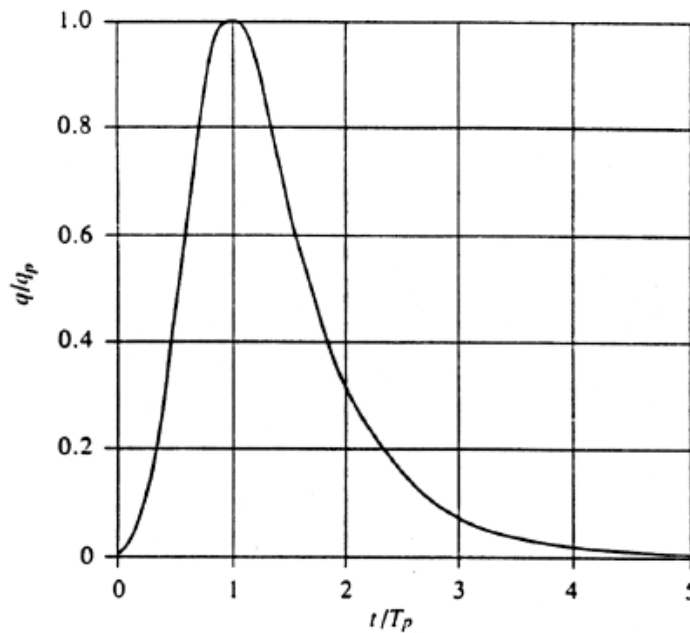


Fig. 5.2. Hidrograma Unitario del SCS

5.2.3. Onda Cinemática

La modelación del proceso de transformación lluvia-escorrentía también puede efectuarse a través de la aplicación de las ecuaciones del movimiento del agua sobre la superficie de la cuenca. Esto permite el conocimiento en detalle de las características del flujo sobre la superficie de la cuenca, pero como contrapartida, es necesario tener información de dicha superficie con el suficiente detalle espacial. La superficie de la cuenca es simulada a través de porciones de plano inclinado, definidos por una rugosidad, una longitud, un ancho y una pendiente (figura 5.3.). El comportamiento del flujo sobre estos planos inclinados se considerará equivalente al comportamiento del mismo sobre la superficie de la cuenca de estudio.

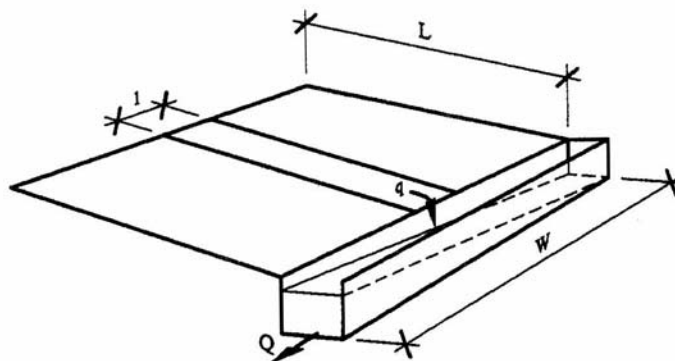


Fig. 5.3. Esquema de planos inclinados para simular la escorrentía sobre la superficie de una cuenca

5.2.4. Método de Muskingum-Cunge

En los puntos en los que se unen varios elementos hidrológicos y el flujo resultante viaja en cauce es necesario realizar un tránsito del hidrograma entrante para obtener el hidrograma de salida. Este tránsito estará formado por una traslación y una atenuación del hidrograma de salida. Se propone el método de Muskingum-Cunge, que es una modificación del método de Muskingum, el cual, a pesar de estar muy aceptado tiene parámetros no basados físicamente y difíciles de obtener.

El método de Muskingum original se basa en la ecuación de continuidad, que para un tramo de cauce establece que:

$Q \text{ entrada} - Q \text{ salida} = \text{Variación del almacenamiento} / \Delta t$, es decir:

$$I - O = \Delta S / \Delta t \quad (5.6)$$

Donde:

I: caudal de entrada medio

Q: caudal de salida medio

$\Delta S = S_2 - S_1$: variación del almacenamiento en el intervalo Δt

Para calcular con exactitud los caudales medios en cada intervalo de tiempo Δt se debería disponer de un hidrograma continuo, pero si solamente se dispone de un dato de caudal para cada Δt los caudales medios pueden ser evaluados haciendo la media de los caudales en dos Δt consecutivos. Así la expresión (5.6) quedaría:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} + \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} \quad (5.7)$$

El almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos partes: un almacenamiento en prisma, que es proporcional al caudal de salida (O), y un almacenamiento en cuña, que es función de la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida ($I - O$), ya que cuanto mayor sea la diferencia más pronunciada será la cuña:

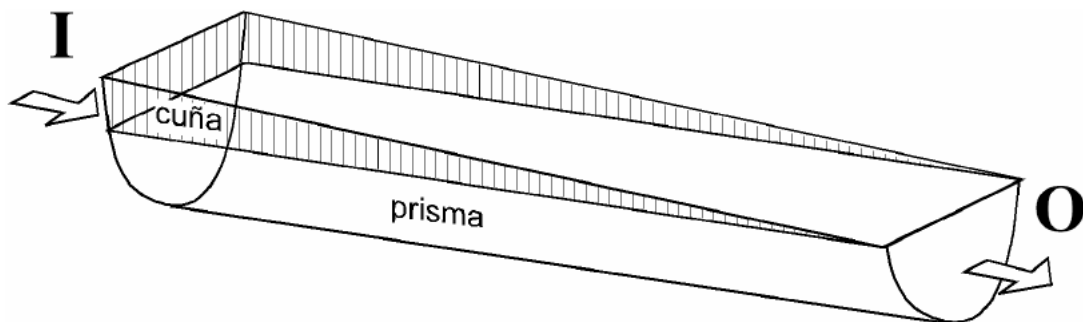


Fig. 5.4. Almacenamiento en prisma y en cuña de un tramo de cauce

$$S_{\text{prisma}} = K \cdot O \quad (5.8)$$

$$S_{\text{cuña}} = K \cdot X \cdot (I - O) \quad (5.9)$$

Sumando las dos expresiones anteriores se obtiene que:

$$S = K [X \cdot I + (1 - X) \cdot O] \quad (5.10)$$

Siendo:

S: almacenamiento en el tramo de cauce considerado.

I: caudal de entrada al tramo.

O: caudal de salida del tramo.

K, X: constantes para el tramo.

Si se aplica la ecuación (5.10) a dos incrementos de tiempo consecutivos se obtiene:

$$S_1 = K [X \cdot I_1 + (1 - X) \cdot O_1] \quad (5.11)$$

$$S_2 = K [X \cdot I_2 + (1 - X) \cdot O_2] \quad (5.12)$$

Sustituyendo las dos expresiones anteriores en la ecuación (5.7) y despejando O_2 resulta finalmente la expresión utilizada para el cálculo:

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (5.13)$$

Siendo:

I_1, I_2 : caudales de entrada en dos incrementos de tiempo sucesivos

O_1, O_2 : caudales de salida de los mismos incrementos de tiempo

$$C_0 = (-KX + 0,5\Delta t) / (K - KX + 0,5\Delta t) \quad (5.14)$$

$$C_1 = (KX + 0,5\Delta t) / (K - KX + 0,5\Delta t) \quad (5.15)$$

$$C_2 = (K - KX + 0,5\Delta t) / (K - KX + 0,5\Delta t) \quad (5.16)$$

K, X: constantes que dependen de cada tramo de cauce

Nótese que $C_0 + C_1 + C_2 = 1$

“K” puede asimilarse al tiempo de recorrido de la onda de un extremo a otro del tramo estudiado, debiendo expresarse en las mismas unidades que Δt (horas o días).

“X” es una constante que en teoría puede estar entre 0 y 0,5 pero que normalmente vale 0,2 y 0,3. Junto con el valor de “K”, de ella va a depender la mayor o menor amortiguación

del hidrograma a lo largo del tramo del cauce. Si por ejemplo $K = \Delta t$ y $X = 0,5$, el hidrograma de salida es idéntico al de entrada pero desplazado a la derecha un tiempo igual a “K”.

La principal problemática de este método es la determinación de los parámetros “K” y “X”, ya que para su estimación se necesitan conocer los caudales de entrada y salida simultáneos para el tramo de cauce de estudio.

En el método de Muskingum-Cunge el cálculo de las constantes “K” y “X” se realiza mediante parámetros del cauce:

$$K = \Delta x / c \quad (5.17)$$

$$X = (1/2) \cdot (1 - (Q / (B \cdot S_0 \cdot c \cdot \Delta x))) \quad (5.18)$$

Siendo:

Δx : longitud del tramo de cauce considerado

C: celeridad = velocidad media · m

Velocidad media: velocidad obtenida con la expresión de Manning:

$$V = (1/n) \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (5.19)$$

m: aproximadamente 5/3 para cauces naturales amplios

S_0 : pendiente media del tramo

Q: caudal

B: ancho del cauce

Por lo tanto, los parámetros necesarios para aplicar el método de Muskingum-Cunge son:

- Longitud del tramo
- Pendiente media del tramo
- Coeficiente de rugosidad del tramo
- Forma y dimensiones de la sección

5.3. Obtención de los Números de Curva

En este estudio la obtención del Número de Curva se realizará según el método basado en la publicación del CEDEX “Generación automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica”. Este método está basado en la transformación de las tablas del umbral de escorrentía (P_0) a valores de Número de Curva. Los valores de P_0 se usan en el método de la Instrucción de Drenaje 5.2-IC del Ministerio de Fomento para determinar caudales punta.

La fórmula empleada para pasar de P_0 a CN es la siguiente:

$$CN = 5000 / (50 - P_0) \quad (5.20)$$

El valor de P_0 , depende de los siguientes parámetros:

- Tipo de suelo, relacionado con el potencial de escurrimiento del suelo.
- Uso y tratamiento del suelo.
- Pendiente del terreno
- Condición de humedad antecedente.

La condición de humedad antecedente se refiere a la precipitación caída en los cinco días anteriores a la fecha de estudio. Hay tres condiciones: condición I para suelos secos, condición II para suelos con una humedad promedio y condición III para suelos con mucha humedad. En estudios de avenidas normalmente se considera la condición II o III.

5.3.1. Tratamiento de la información geológica

Respecto al tipo de suelo hay que clasificarlo en uno de los cuatro grupos hidrológicos existentes. Estos grupos van desde A hasta D, representando el grupo A un potencial de escurrimiento mínimo y el D un potencial de escurrimiento alto. Para asignar a un suelo un grupo determinado hay que considerar su composición, su textura y la profundidad del nivel freático.

Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Arenosa-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeña (litosuelo) u horizontales de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Tabla 5.1. Clasificación de los suelos a efectos del umbral de escorrentía

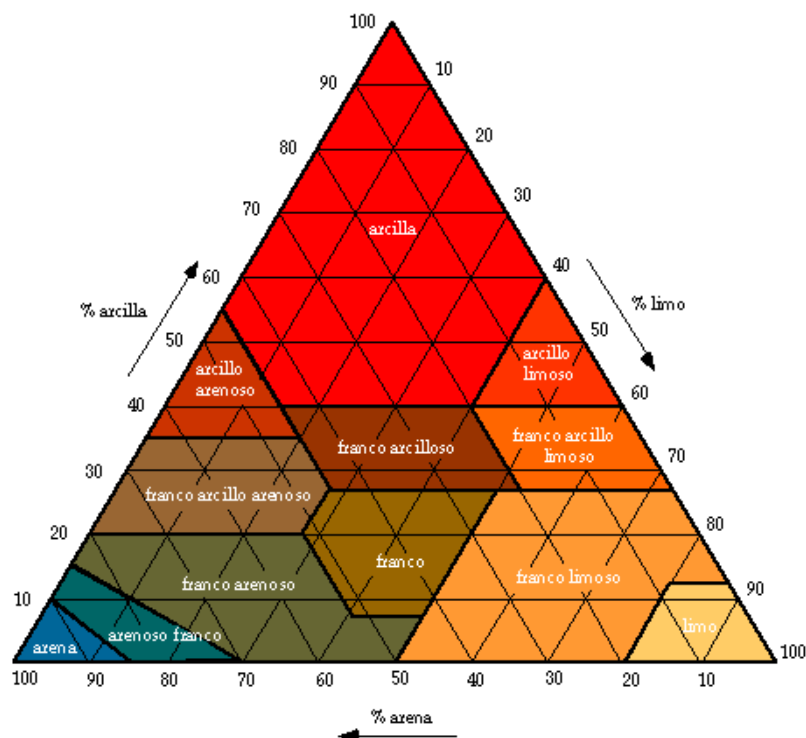


Figura 5.1. Diagrama triangular para la determinación del grupo hidrológico del suelo en función de la textura.

Para clasificar el suelo de nuestra zona de estudio dentro de su grupo hidrológico correspondiente, se ha partido de mapas geológicos editados por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España en 1977, a escala 1:50.000 y en formato shapefile.

El tratamiento a realizar con la información geológica es asignarle a cada elemento de la leyenda un grupo hidrológico de suelo A, B, C o D. La asignación a una clase geológica no es directa, por lo que hay que realizar un estudio de la memoria geológica de cada hoja, donde se dan indicaciones más precisas de la geología del suelo.

Se ha tenido en cuenta que debido al cabalgamiento producido en la edatosfera millones de años atrás, las rocas metamórficas que se encuentran en la Península Ibérica destacan por su grado de fracturación. Esto hace que minerales geológicos como las pizarras, que en un principio pueden ser consideradas como minerales con poca permeabilidad, una vez que se encuentran fracturados aumenta su permeabilidad debido a los huecos creados con la aparición de las fracturas.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que, el estado de las rocas no es el mismo según estén aflorando en la superficie o, formando parte del subsuelo, en este estudio también se tendrán en cuenta estos dos aspectos a la hora de asignar los grupos de “tipos de suelo”.

Siguiendo lo expuesto anteriormente se ha propuesto la siguiente clasificación de las formaciones edáficas con el fin de que se ajusten lo máximo posible a la zona de estudio.

- Grupo A: este grupo se caracteriza por una alta permeabilidad. Se aplica a cuerpos sedimentarios actuales con textura granular y poco o nada cementados. Algún ejemplo sería: aluviones, coluviones, terrazas, etc.
- Grupo B: en este grupo se encuentran los cuerpos sedimentarios antiguos con textura heterogénea y cementación parcial. También son típicas las rocas metamórficas fracturadas o rocas de sedimentación química carstificadas. La permeabilidad de este grupo es intermedia. Algunos ejemplos son: areniscas, conglomerados, brechas, cuarcitas, filitas, etc.
- Grupo C: este grupo se caracteriza por una impermeabilidad media. Está formado por cuerpos sedimentarios con textura granular y tamaño de grano de fino a grueso. Su cementación es parcial, destacando las rocas carbonatadas y calcoalcalinas. Como ejemplo se destaca: andesitas, dacitas, dolomías, calizas, etc.
- Grupo D: en este grupo la impermeabilidad es alta y se constituye por cuerpos formados a partir de la solidificación de un magma y su posterior cristalización con textura porfídica y tamaño de grano muy fino, como las rocas ígneas. Los ejemplos más claros son: cenizas volcánicas, caliche, margas, cineritas, etc.

En la tabla siguiente se muestra una clasificación propuesta.

Código_DLO	Grupo
Alternancia de argilitas rojas y cuarcitas de varios colores.Localmente carbonatos en el techo	B
Aluviones	A
Aluviones y Coluviones actuales	A
Andesitas	C
Andesitas hipersténicas	C
Andesitas y doreitas biotíticas piroxénicas	C
Andesitas y doreitas biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal	C
Anfibolitas epidóticas y gneises	B
Anfibolitas epidóticas y gneises albíticos	B
Arcillas, brechas, caliche y conglomerado	D
Arenas y margas	B
Arenas, calizas bioclásticas y conglomerados	B
Arenisca en delgados niveles	B
Areniscas	B
Areniscas a caliza arenosa	B
Areniscas amarillentas	B
Areniscas rojas, filitas, cuarcitas y pizarras	B
Areniscas rojizas	B
Areniscas y calcarenitas	B
Areniscas y conglomerados	B
Areniscas y microconglomerados	B
Argilitas rojas y cuarcitas	B
Argilitas rojas y pardas, cuarcitas	B

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas
mediterráneas

Código_DLO	Grupo
Argilitas rojas, cuarcitas y conglomerados. A veces, en el techo delgados bancos de caliza y yeso	D
Argilitas, cuarcitas y conglomerados calizos intercalados	D
Basaltos	D
Brechas	B
Calizas bioclásticas	B
Calizas recristalizadas crema	B
Calizas tableadas azules	B
Calizas y conglomerados	B
Calizas, dolomías gris amarillento y margas amarillentas	D
Coluvial	A
Conglomerados	B
Conglomerados con cantos redondeados	B
Conglomerados rojos con bloques	B
Conglomerados y margas	D
Conglomerados, arenas y margas	C
Conglomerados, areniscas y lumaquelas	B
Conglomerados, areniscas y margas	C
Conos de deyección	A
Cuarcitas blancas, micaesquistos plateados y gneises albíticos	B
Cuarcitas claras, micaesquistos plateados, calizas y gneises albíticos	B
Cuarcitas micáceas	D
Cuarcitas y micoesquistos negros con granates, estauroлитas y cloritoides	B
Cuarcitas, filitas y calcoesquistos	B
Cuaternalario indiferenciado	B
Dacitas con alteración hidrotermal	C
Dacitas, riódacitas tobas y vitrófidos	C
Derrubios de ladera	A
Diabasas	D
Diabasas, metabasitas y serpentinitas	D
Dolomías grises oscuras	C
Dolomías	C
Dolomías negras y calizas	C
Dolomías y calizas	C
Filitas con cuarcitas y yesos intercalados	B
Filitas grises	B
Filitas grises con cuarcitas intercaladas. Yeso y carbonatos en el techo	B
Filitas grises, verdosas y negras cuarcitas intercaladas. Numerosas venas de cuarzo	B
Filitas y cuarcitas intercaladas	B
Filitas, cuarcitas y calco esquistos	B
Filitas, cuarcitas y carbonatos	B
Glacis con cantos de cuarcita	C
Glacis con cantos poligénicos	C

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas
mediterráneas

Código_DLO	Grupo
Glacis de limos rojos y grises	C
Glacis de limos y cantos	C
Glacis encostrado	C
Glacis. Limos negros y rojos y cantos encostrados	C
Grauvacas con intercalaciones de rocas carbonatadas	B
Indiferenciado	C
Limos de marismas	D
Limos rojos y costras (Sucina)	D
Limos y arcillas rojas con episodios de caliche	D
Margas	D
Margas amarillentas	D
Margas arenosas y margas	C
Margas blancas	D
Margas con "ostras"	D
Margas grises	D
Margas rojas y caliche	C
Margas y areniscas	C
Margas y yeso	C
Margas, areniscas y arenas	C
Marismas	C
Metabasitas	B
Micacitas con granates	B
Micaesquistos	B
Micaesquistos y cuarcitas	B
Micaesquistos y cuarcitas negras con granate estauroлита y cloritoide	B
Mármoles calizo-dolomíticos blancos y cremas	D
Mármoles calizos y dolomíticos	D
Mármoles fajeados	D
Mármoles fajeados y gneises albíticos verdes	C
Mármoles fajeados y mármoles blancos y crema	D
Mármoles y brechas calcáreas intraformacionales	C
Pizarras micáceas y micacitas	B
Pizarras verdes y púrpura	B
Playas	B
Rocas carbonatadas	C
Rocas carbonatadas con filitas y pizarras intercaladas	C
Rocas carbonatadas gris amarillento y gris oscuro, con filitas en la base	C
Rocas carbonatadas grises a negras con sílex en la parte inferior	C
Rocas carbonatadas y pizarras	C
Rocas carbonatadas y yeso	C
Rocas lamprofídicas	D
Terrazas	A
Yesos	C

Tabla 5.2. Clasificación propuesta de grupos hidrológicos del suelo

5.3.2. Tratamiento de la información de usos de suelo

La información utilizada para la caracterización de los usos del suelo en este proyecto ha sido tomada por el proyecto CORINE Land Cover 2000 (CLC2000). El objetivo de este proyecto es la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos sobre la cobertura y uso de todo el territorio europeo, así como la permanente actualización de dicha base de datos geográfica. La nomenclatura es jerárquica, distinguiendo 5 niveles y 85 clases.

La escala cartográfica de esta base de datos es 1:100.000, aunque utilizando como referencia IMAGE2000 se ha conseguido que la precisión cartográfica mínima sea de 25 metros. Esta es la gran ventaja del proyecto CORINE, ya que la identificación de cada punto es muy buena, aunque por el contrario existe el inconveniente de que los bordes de los polígonos no están bien definidos. Este inconveniente se puede solucionar modificando los polígonos sobre una ortofoto tomada en fecha similar a la captura de la información del CORINE (año 1999-2000).

Será necesario realizar una transformación de la leyenda de usos del suelo para aplicar el método elegido de obtención del Número de Curva. Ver punto siguiente.

5.3.3. Generación con la publicación del CEDEX

En la publicación del CEDEX “Generación automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica” se propone una metodología para la obtención del Número de Curva utilizando herramientas SIG. Esta metodología se basa en transformar los valores de umbral de escorrentía P_0 de la instrucción 5.2-IC a valores de Número de Curva y posteriormente reclasificar las fuentes de información necesarias con números primos.

La metodología es la siguiente:

1. Clasificar la leyenda geológica a grupos geológicos del suelo, según la tabla 5.2.

En este paso habrá que unir las hojas de geología correspondientes con la zona de estudio mediante la herramienta “merge” en ArcMap. Es conveniente recortar dicha capa shape con el tamaño de la cuenca, con el fin de evitar trabajar con tipos de suelo que no corresponden con la zona de estudio. Para cada formación edáfica será necesario asignarle un grupo de suelo, así como su correspondencia en número primo. Para este proceso se ha utilizado la tabla 5.2., así como el criterio, explicado anteriormente, para la distinción entre grupo de suelo (grupo A, B, C y D).

Una vez asignados todos los tipos de suelo a su grupo geológico correspondiente, ya se tiene la capa en formato shape para utilizar en la generación del CN.

Durante este proceso, se han detectado errores en las uniones de las hojas, es decir, al unir las hojas se producen cortes bruscos entre los tipos de suelo. Para solventar este imprevisto se han estudiado las épocas y la heterogeneidad de los datos en las zonas de unión entre hojas y se ha corregido el error.

Una vez salvados todos los imprevistos encontrados durante el proceso, es necesario ‘disolver’ la capa shape. Con esto se consigue reducir la tabla de atributos de la capa, limitándola a que muestre diferencias sólo entre tipos de suelo que pertenezcan a distintos grupos de suelo. Para ello se usará la herramienta “*dissolve*” en ArcTools; poniendo como campo de unión los grupos. De esta forma se consigue una tabla de atributos con cuatro campos, cada uno correspondiente a un grupo de suelo distinto.

2. Generar el mapa de pendientes y clasificar en dos grupos: <3% y ≥3%. Después hay que reclasificar, asignando el valor 1 a las celdas con pendiente inferior al 3% y 2 para pendientes iguales o superiores al 3%.

Para ello, en ArcMap > 3DAnalyst Tools > Raster surface > Slope, clasificando el raster con valores de 0-3 y >3. Seguidamente se reclasifica y se convierte a formato shape.

3. Clasificar los usos del suelo de acuerdo a la leyenda propuesta en el método. Una propuesta se recoge en la tabla 5.3.

Para determinar los usos de suelo se ha partido de la clasificación del CORINE, realizada en el año 2000. Dicha información fue proporcionada en formato e00 y con una extensión igual al de la Región de Murcia.

El objetivo es conseguir un recorte igual a la superficie de la cuenca, con el fin de estudiar sólo los usos de suelo de la zona de interés. Para ello se procederá de la siguiente forma:

- Se transforma el CORINE 2000 en formato e00 a cobertura. En ArcTools > Coverage Tools > Conversion > To Coverage > Import from interchanged. Seguidamente hay que limpiar la cobertura mediante la herramienta “*clean*” en Arctool > Coverage Tools > Data Managment Tools > Topology > Clean.
- Esta cobertura a su vez es transformada a shape. Y, a partir de este shape y con la herramienta clip (ArcTolls) se consigue un shape igual que el tamaño de la cuenca.

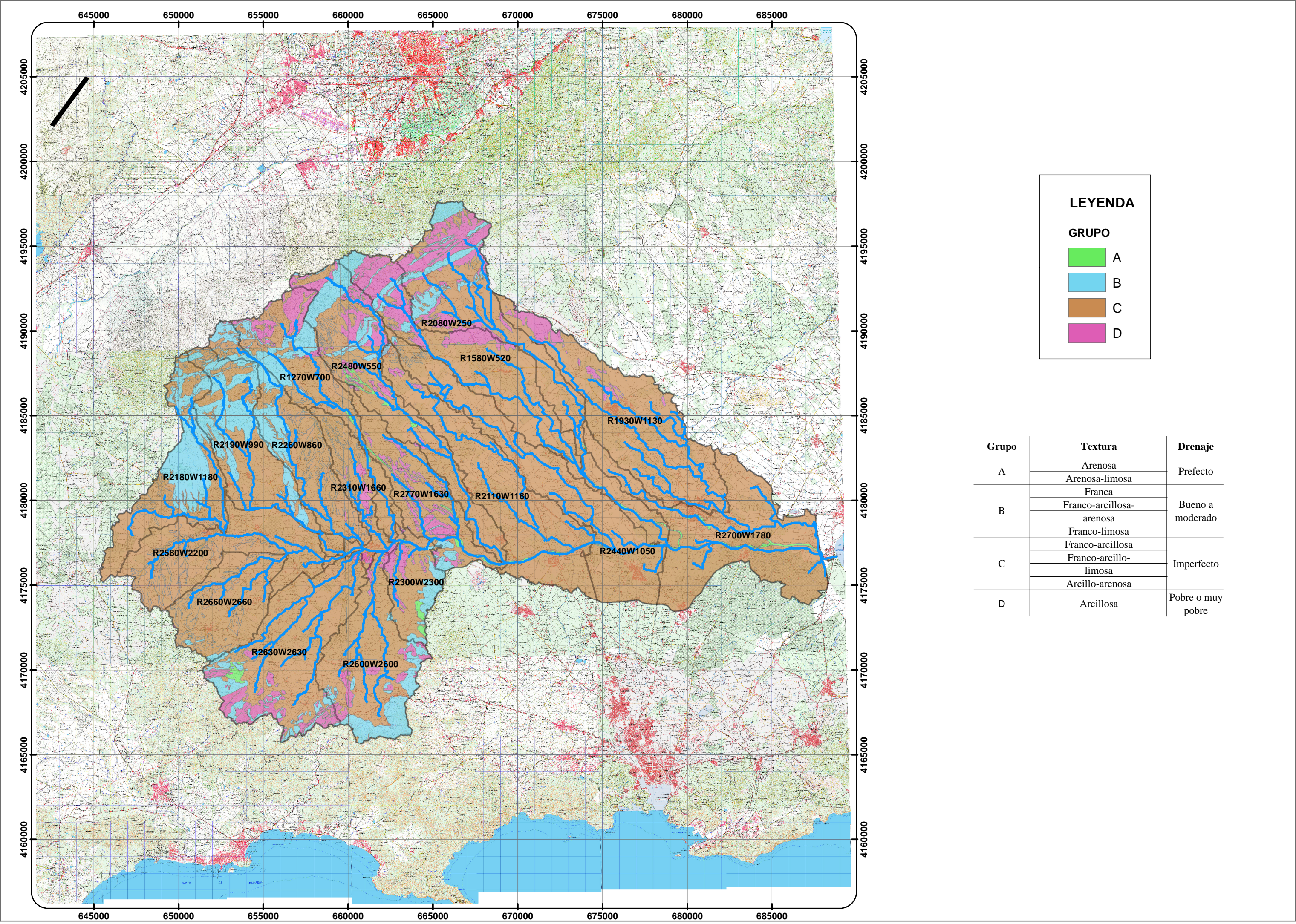
Una vez conseguido este polígono, el siguiente paso será estudiar la clasificación del CORINE y compararla con la del CEDEX. Para este proceso se utilizará la tabla 5.3.

Usos de suelo_CORINE	Usos de suelo_Método CEDEX
Aeropuertos	Impermeable
Autopistas, autovías y terrenos asociados	Impermeable
Bosque mixto	Masa forestal media
Bosques de coníferas con hojas aciculares	Masa forestal espesa
Campos de golf	Pradera muy buena
Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión	Rocas permeables
Cítricos en regadío	Plantación regular de aprovechamiento forestal medio
Cultivos agrícolas en secano con zonas de vegetación natural	Rotación de cultivos pobres
Cultivos anuales permanentes en regadío	Rotación de cultivos densos
Cultivos anuales permanentes en secano	Rotación de cultivos pobres

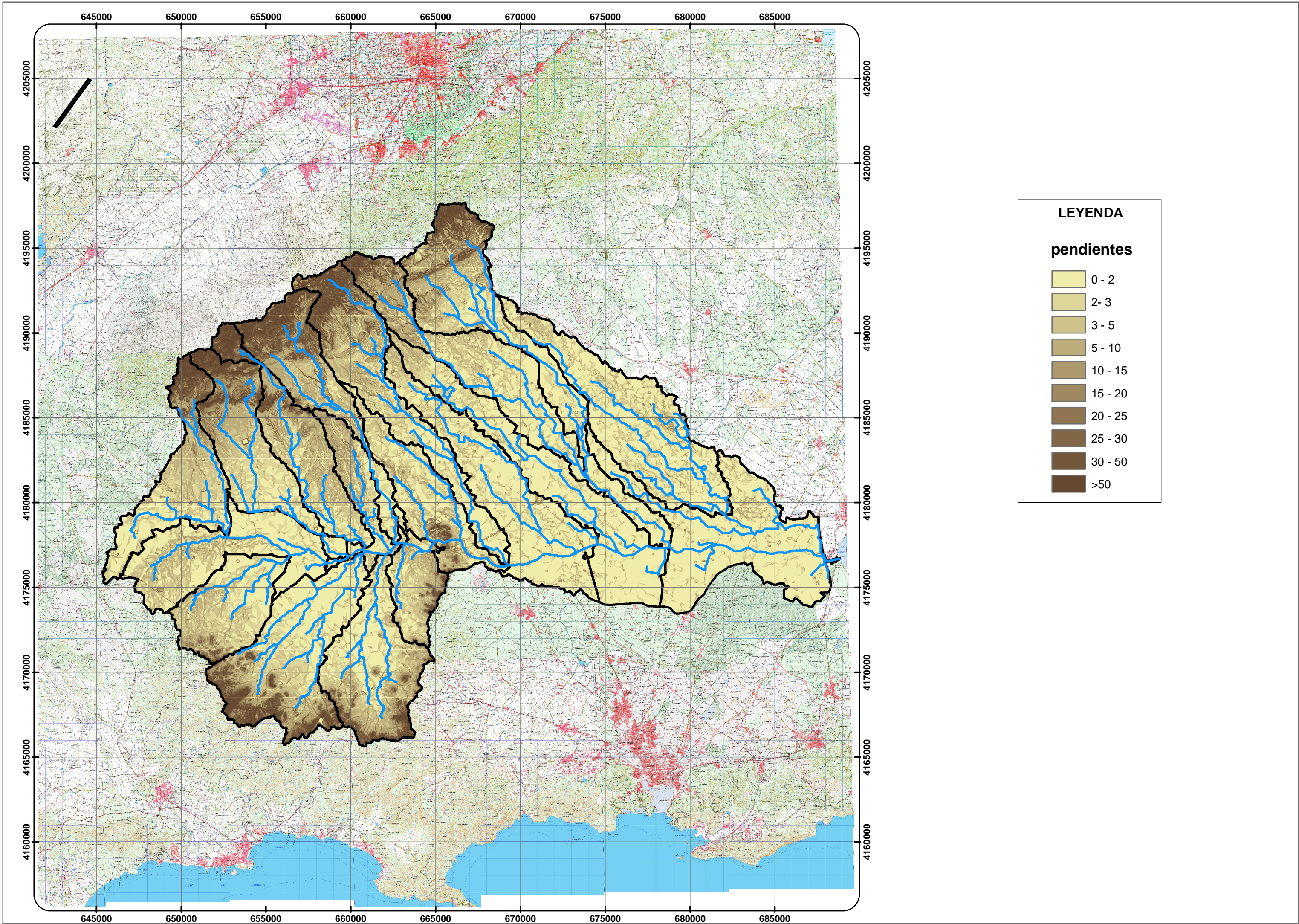
Usos de suelo_CORINE	Usos de suelo_Método CEDEX
Cultivos herbáceos en regadío	Rotación de cultivos densos
Cultivos permanentes en regadío	Rotación de cultivos densos
Cultivos permanentes en secano	Rotación de cultivos pobres
Embalses	Impermeable
Escombreras y vertederos	Barbecho
Frutales en secano	Plantación regular de aprovechamiento forestal pobre
Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso	Masa forestal clara
Grandes superficies de equipamientos y servicios	Impermeable
Lagunas costeras	Impermeable
Matorral boscoso de coníferas	Masa forestal media
Matorrales subarborescentes muy poco densos	Masa forestal muy clara
Olivares en regadío	Rotación de cultivos densos
Otras instalaciones deportivas y recreativas	Impermeable
Otras zonas de irrigación	Pradera pobre
Otros frutales en regadío	Plantación regular de aprovechamiento forestal medio
Pastizales naturales mediterráneos	Pradera pobre
Playas y dunas	Masa forestal muy clara
Ramblas con poca o sin vegetación	Masa forestal muy clara
Tejido urbano continuo	Impermeable
Tejido urbano discontinuo	Impermeable
Tierras de labor en secano	Rotación de cultivos pobres
Viñedos en regadío	Cultivos en hilera
Xeroestepa subdesértica	Masa forestal muy clara
Zonas de extracción minera	Pradera pobre
Zonas en construcción	Impermeable
Zonas industriales	Impermeable
Zonas verdes urbanas	Pradera pobre

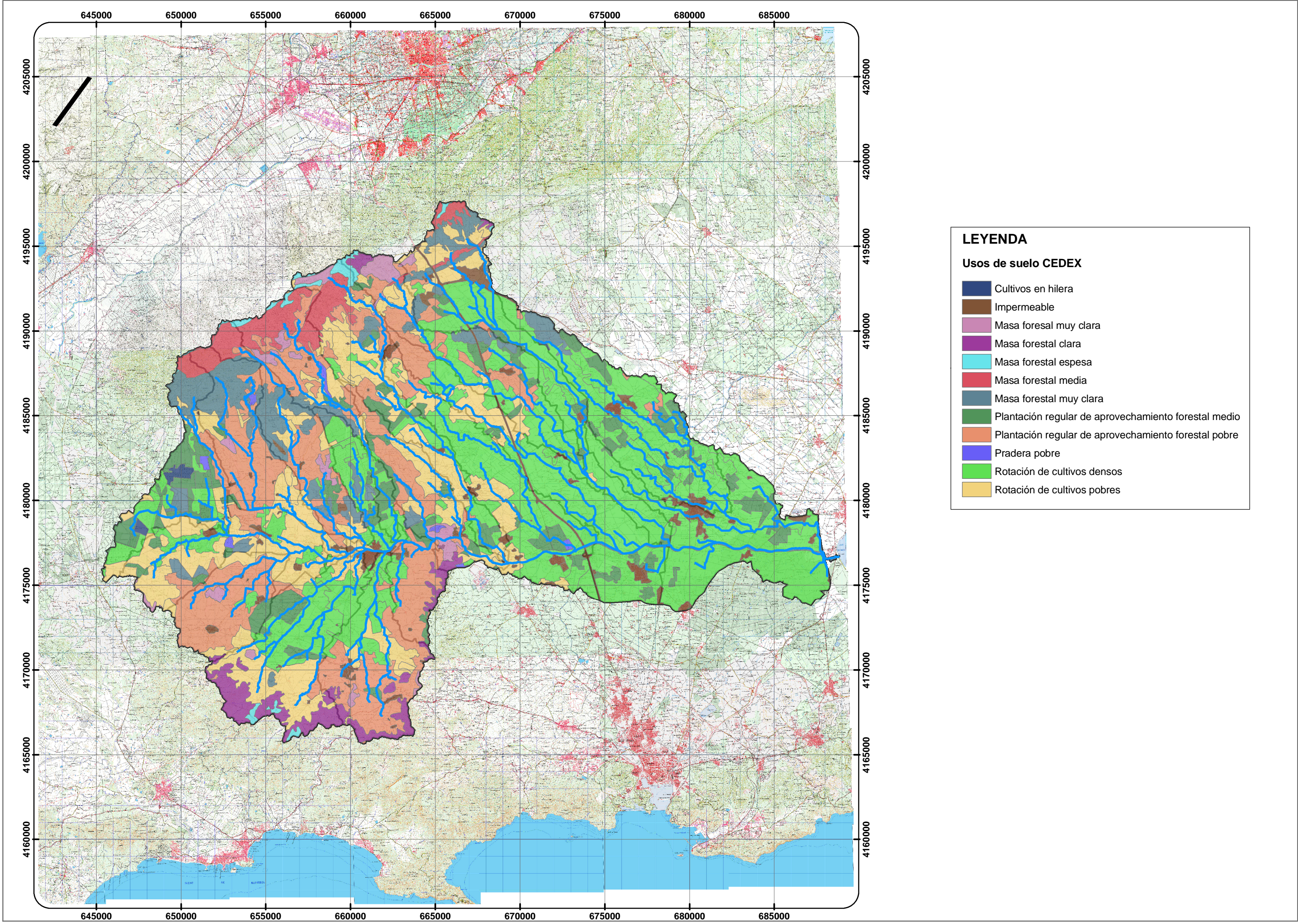
Tabla 5.3. Clasificación de los usos del suelo para aplicar el método del CEDEX

El resultado final de pendientes, tipos de suelo y usos de suelo para la cuenca completa del Albuñón se muestra en los siguientes planos:



Grupo	Textura	Drenaje
A	Arenosa	Perfecto
	Arenosa-limosa	
B	Franca	Bueno a moderado
	Franco-arcillosa-arenosa	
	Franco-limosa	
C	Franco-arcillosa	Imperfecto
	Franco-arcillo-limosa	
	Arcillo-arenosa	
D	Arcillosa	Pobre o muy pobre





4. **Reclasificar pendientes, tipos y usos de suelo** de acuerdo con la tabla 5.4. de números primos.

5. **Multiplicar las tres capas.** El motivo de hacer una reclasificación con números primos es que al multiplicar las tres capas reclasificadas sólo habrá un único número expresado como combinación de las tres variables que condicionan el valor del Número de Curva.

6. Por último, hay que deshacer la reclasificación pasando de números primos a Números de Curva, utilizando las tablas 5.5. y 5.6. Así a cada número primo le corresponderá un Número de Curva.

A continuación se muestran las tablas 5.4., 5.5. y 5.6.usadas en el método:

Característica	Número primo
Pendiente < 3%	1
Pendiente ≥ 3%	2
Grupo hidrológico de suelo A	3
Grupo hidrológico de suelo B	5
Grupo hidrológico de suelo C	7
Grupo hidrológico de suelo D	11
Barbecho	13
Cultivos en hilera	17
Cereales de invierno	19
Rotación de cultivos pobres	23
Rotación de cultivos densos	29
Pradera pobre	31
Pradera media	37
Pradera buena	41
Pradera muy buena	43
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	47
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal medio	53
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal bueno	59
Masa forestal (bosques, montes bajo,...) muy clara	61
Masa forestal (bosques, monte bajo,...) clara	67
Masa forestal (bosques, monte bajo,...) media	71
Masa forestal (bosques, monte bajo,...) espesa	73
Masa forestal (bosques, monte bajo,...) muy espesa	79
Rocas permeables	83
Rocas impermeables	89

Tabla 5.4. Reclasificación de números primos

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas
mediterráneas

Uso del suelo	Pendiente	A	B	C	D
Barbecho	≥ 3%	77	68	89	93
Barbecho	<3%	71	78	82	86
Cultivos en hilera	≥ 3%	69	79	86	89
Cultivos en hilera	<3%	64	73	78	82
Cereales de invierno	≥ 3%	63	75	83	86
Cereales de invierno	<3%	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres	≥ 3%	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres	<3%	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos	≥ 3%	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos	<3%	52	67	76	79
Pradera pobre	≥ 3%	68	78	86	89
Pradera media	≥ 3%	49	69	78	85
Pradera buena	≥ 3%	42	60	74	79
Pradera muy buena	≥ 3%	39	55	69	77
Pradera pobre	<3%	46	67	81	88
Pradera media	<3%	39	59	75	83
Pradera buena	<3%	29	48	69	78
Pradera muy buena	<3%	17	33	67	76
Plantac. regul. aprovech. forestal pobre	≥ 3%	45	66	77	83
Plantac. regul. aprovech. forestal medio	≥ 3%	39	60	73	78
Plantac. regul. aprovech. forestal bueno	≥ 3%	33	54	69	77
Plantac. regul. aprovech. forestal pobre	<3%	40	60	73	78
Plantac. regul. aprovech. forestal medio	<3%	35	54	69	77
Plantac. regul. aprovech. forestal bueno	<3%	25	50	67	76
Masa forestal muy clara	no depende	56	75	86	91
Masa forestal clara	no depende	46	68	78	83
Masa forestal media	no depende	40	60	69	76
Masa forestal espesa	no depende	36	52	62	69
Masa forestal muy espesa	no depende	29	44	54	60
Rocas permeables	≥ 3%	94	94	94	94
Rocas permeables	<3%	91	91	91	91
Rocas impermeables	≥ 3%	96	96	96	96
Rocas impermeables	<3%	93	93	93	93

Tabla 5.5. Números de curva

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas
mediterráneas

Uso del suelo	Pendiente	A	B	C	D
Barbecho	≥ 3%	78	130	182	286
Barbecho	<3%	39	65	91	143
Cultivos en hilera	≥ 3%	102	170	238	374
Cultivos en hilera	<3%	51	85	119	187
Cereales de invierno	≥ 3%	114	190	266	418
Cereales de invierno	<3%	57	95	133	209
Rotación de cultivos pobres	≥ 3%	138	230	322	506
Rotación de cultivos pobres	<3%	69	115	161	253
Rotación de cultivos densos	≥ 3%	174	290	406	638
Rotación de cultivos densos	<3%	87	145	203	319
Pradera pobre	≥ 3%	186	310	434	682
Pradera media	≥ 3%	222	370	518	814
Pradera buena	≥ 3%	246	410	574	902
Pradera muy buena	≥ 3%	258	430	602	946
Pradera pobre	<3%	93	155	217	341
Pradera media	<3%	111	185	259	407
Pradera buena	<3%	123	205	287	451
Pradera muy buena	<3%	129	215	301	473
Plantac. regul. aprovech. forestal pobre	≥ 3%	282	470	658	1034
Plantac. regul. aprovech. forestal medio	≥ 3%	318	530	742	1166
Plantac. regul. aprovech. forestal bueno	≥ 3%	354	590	826	1298
Plantac. regul. aprovech. forestal pobre	<3%	141	235	329	517
Plantac. regul. aprovech. forestal medio	<3%	159	265	371	583
Plantac. regul. aprovech. forestal bueno	<3%	177	295	413	649
Masa forestal muy clara	≥ 3%	366	610	854	1342
Masa forestal clara	≥ 3%	402	670	938	1474
Masa forestal media	≥ 3%	426	710	994	1562
Masa forestal espesa	≥ 3%	438	730	1022	1606
Masa forestal muy espesa	≥ 3%	474	790	1106	1738
Masa forestal muy clara	<3%	183	305	427	671
Masa forestal clara	<3%	201	335	469	737
Masa forestal media	<3%	213	355	497	781
Masa forestal espesa	<3%	219	365	511	803
Masa forestal muy espesa	<3%	237	395	553	869
Rocas permeables	≥ 3%	498	830	1162	1826
Rocas permeables	<3%	249	415	581	913
Rocas impermeables	≥ 3%	534	890	1246	1958
Rocas impermeables	<3%	267	445	623	979

Tabla 5.6. Valores resultantes del producto de los números primos

El resultado final de los números de curva se presenta en el apartado 6.6.2.

5.4. Datos pluviométricos

Para obtener los datos de precipitación de cálculo hay que aplicar unos coeficientes correctores a los valores de precipitación máxima calculados. Además, el valor de precipitación de cálculo tiene que ser distribuido mediante un patrón de distribución, para obtener así la tormenta proyecto.

5.4.1. Correcciones

Para obtener los datos de precipitación de cálculo sobre una cuenca la Organización Meteorológica Mundial propone aplicar tres correcciones a los valores de precipitación máxima diaria obtenidos para cada periodo de retorno. Estas tres correcciones son: por número de observaciones, por simultaneidad y por área de la cuenca-duración del chubasco.

✓ Número de observaciones

Los datos de precipitación facilitados por el AEMET corresponden a un valor de precipitación cada 24 horas. Cuanto menor sea el número de observaciones de los datos de precipitación mayor será el valor del coeficiente corrector, ya que habrá que compensar las pérdidas por evaporación, mientras que cuantas más observaciones se hagan el coeficiente tenderá a valer 1, ya que las pérdidas se irán reduciendo. Según la Figura 5.6., para un valor observado cada 24 horas, el coeficiente de corrección a aplicar será 1,13.

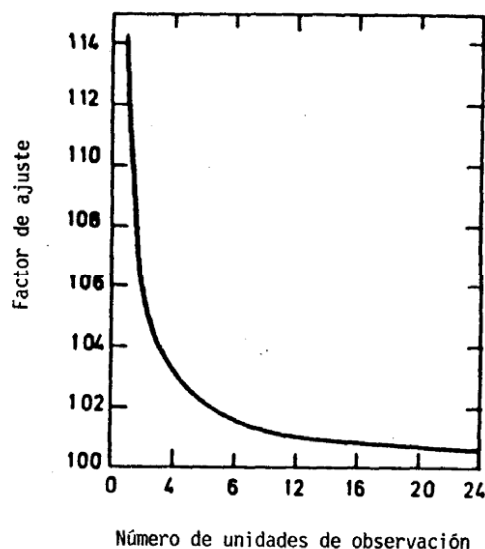


Fig. 5.2. Valores del coeficiente de corrección en función del número de observaciones en 24 horas

✓ Simultaneidad

La corrección por simultaneidad se aplica para obtener valores de precipitación areal sobre una cuenca a partir de los valores puntuales previamente estimados. La estimación de este factor se realiza aplicando la siguiente ecuación:

$$K_a = 1 - \frac{\log A}{15} \quad (5.21)$$

Donde A es el área de la cuenca en km².

✓ Área de la cuenca- Duración del chubasco

Por último, la Organización Meteorológica Mundial propone aplicar también un factor de corrección en función del área de la cuenca y de la duración de la tormenta de proyecto.

Para cuencas con una superficie menor de 25 km² este factor vale 1, y se va reduciendo a medida que la superficie de la cuenca aumenta y la duración de la tormenta de proyecto se reduce. Mediante la siguiente figura se puede determinar el valor del coeficiente corrector.

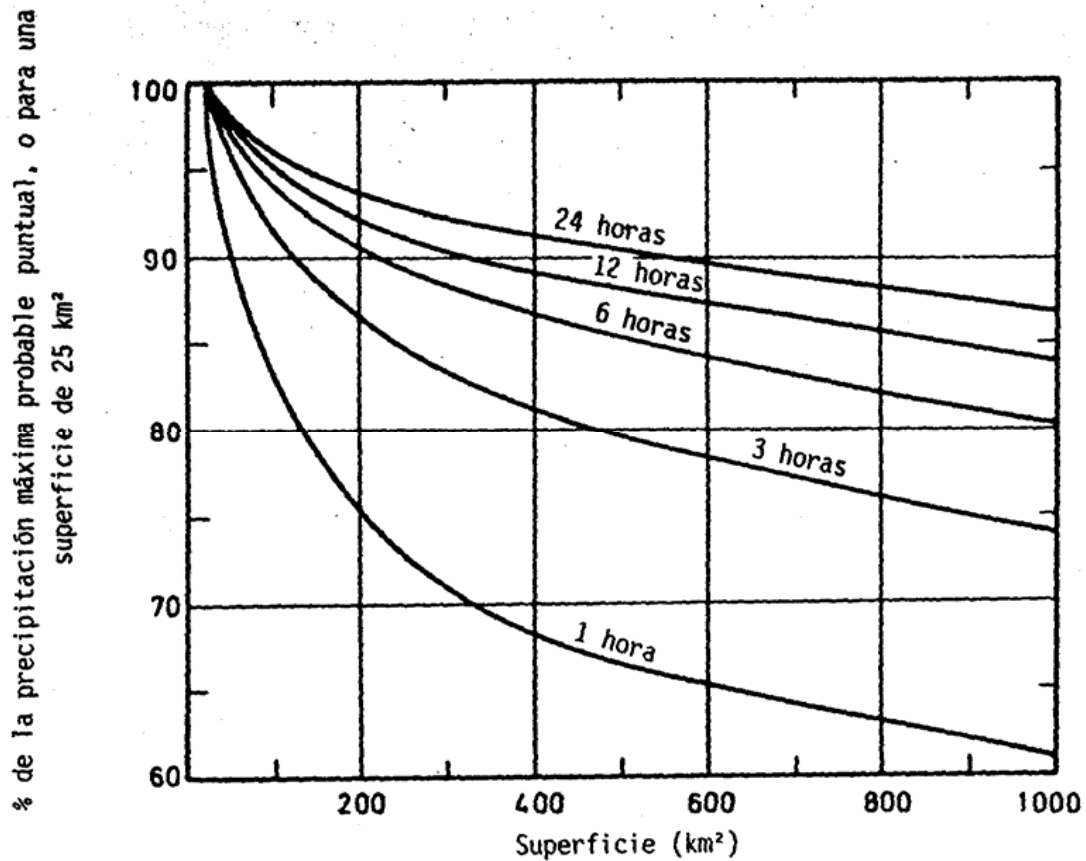


Fig. 5.3. Curvas de corrección de la precipitación en función de la superficie y de la duración de la tormenta de proyecto

5.4.2. Patrones de precipitación

A la hora de representar la variabilidad temporal de la precipitación, se ha considerado un patrón de distribución de los valores de la precipitación máxima diaria de cálculo.

✓ LINDE modificado

Originalmente en el proyecto LINDE se utilizó un patrón de distribución de precipitación de una duración de seis horas.

Por otro lado según la OMM, en un chubasco de 24 horas de duración, el 80% de la precipitación cae en 6 horas y el 20% en las otras 18 horas.

Por lo tanto, para transformar el patrón original de 6 horas de duración y obtener un patrón con una duración de 24 horas se ha optado por concentrar el 80% de la precipitación máxima diaria en 6 horas con la distribución original del proyecto LINDE, y el 20% restante distribuirlo en las 9 horas anteriores y en las 9 horas posteriores. Como el valor de precipitación aportado por estas dos largas colas no va a influir en el valor del caudal pico se ha optado por hacer una distribución uniforme.

La forma final del patrón de precipitación, con intervalos de 15 minutos es la siguiente:

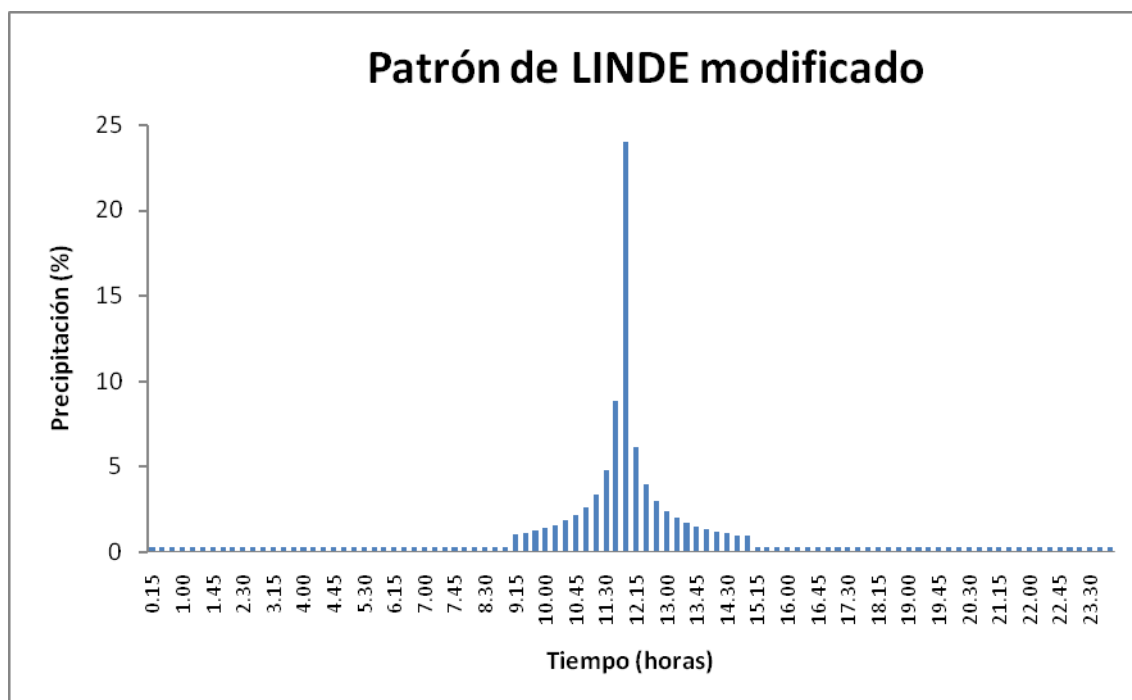


Fig. 5.4. Patrón de precipitación de LINDE modificado

En la siguiente tabla se muestran los valores de precipitación porcentual del patrón LINDE modificado, para cada intervalo de 15 minutos.

Tiempo (h)	Precipitación (%)	Tiempo (h)	Precipitación (%)
0:15	0,28	12:15	6,15
0:30	0,28	12:30	3,95
0:45	0,28	12:45	2,95
1:00	0,28	13:00	2,36
1:15	0,28	13:15	1,97
1:30	0,28	13:30	1,69
1:45	0,28	13:45	1,48
2:00	0,28	14:00	1,32
2:15	0,28	14:15	1,18
2:30	0,28	14:30	1,07
2:45	0,28	14:45	0,98
3:00	0,28	15:00	0,94
3:15	0,28	15:15	0,28
3:30	0,28	15:30	0,28
3:45	0,28	15:45	0,28
4:00	0,28	16:00	0,28

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas
mediterráneas

Tiempo (h)	Precipitación (%)	Tiempo (h)	Precipitación (%)
4:15	0,28	16:15	0,28
4:30	0,28	16:30	0,28
4:45	0,28	16:45	0,28
5:00	0,28	17:00	0,28
5:15	0,28	17:15	0,28
5:30	0,28	17:30	0,28
5:45	0,28	17:45	0,28
6:00	0,28	18:00	0,28
6:15	0,28	18:15	0,28
6:30	0,28	18:30	0,28
6:45	0,28	18:45	0,28
7:00	0,28	19:00	0,28
7:15	0,28	19:15	0,28
7:30	0,28	19:30	0,28
7:45	0,28	19:45	0,28
8:00	0,28	20:00	0,28
8:15	0,28	20:15	0,28
8:30	0,28	20:30	0,28
8:45	0,28	20:45	0,28
9:00	0,28	21:00	0,28
9:15	1,02	21:15	0,28
9:30	1,12	21:30	0,28
9:45	1,24	21:45	0,28
10:00	1,39	22:00	0,28
10:15	1,58	22:15	0,28
10:30	1,82	22:30	0,28
10:45	2,14	22:45	0,28
11:00	2,62	23:00	0,28
11:15	3,37	23:15	0,28
11:30	4,79	23:30	0,28
11:45	8,87	23:45	0,28
12:00	24,02	24:00	0,28

Tabla 5.7. Datos de precipitación del patrón del proyecto LINDE modificado

6. Aplicación de la metodología a un caso real: Cuenca de la Rambla del Albuñón

6.1. Descripción de la zona de estudio

El campo de Cartagena es una región natural, geográficamente muy bien definida y situada en el sureste de Murcia. Se caracteriza geomorfológicamente por su amplia llanura, con pequeña inclinación hacia el sureste, rodeada en todos sus contornos, a excepción de la zona litoral, por elevaciones montañosas.

En el campo de Cartagena no existen cursos permanentes de agua. Al igual que en otras llanuras áridas del sureste, son numerosas las ramblas de cauces anchos y planos, que confieren a la región una morfología peculiar y característica. Estas ramblas recogen aguas en las épocas de lluvia, pues, aunque escasas, suelen ser muy intensas a consecuencia del régimen climático de tipo mediterráneo. La escorrentía superficial se drena en las sierras a través de numerosas ramblas de recorridos generalmente cortos y sinuosos, incorporándose progresivamente en la llanura a un sistema más jerarquizado que vierte al Mar Menor. Algunas se extinguen en la planicie debido a la escasez de pendiente y a la permeabilidad de los terrenos circundantes, o bien se ramifica en una escorrentía difusa.

El principal colector del Campo de Cartagena es la rambla de Fuente Álamo, que se inicia en las proximidades de este pueblo y sigue en dirección oeste para adoptar, entre Venta Redonda y Boca Rambla, el nombre de rambla del Albuñón, a unos 5 Km al sur de Los Alcázares, ya con su cauce prácticamente colmatado de sedimentos finos. Esta rambla recoge las aportaciones procedentes de la sierra de Carrascoy, principalmente de la rambla de la Murta, así como con las procedentes de las sierras del Algarrobo, Victorias y Gómez, que se incorporan a la rambla de Fuente Álamo por su margen derecha.

6.2. Obtención del MDE en formato raster

Para la realización de este estudio se ha partido de un MDT con un tamaño de celda de 4 metros x 4 metros y de una ortofoto de la zona de estudio.

Para empezar a trabajar con el MDT fue necesario realizar un mosaico de todas las hojas que ocupan la zona. Para ello se utilizó la herramienta “mosaic” dentro del menú de Arctools > Data Management Tools > Raster > Mosaic.

Con este proceso se consigue la unión de todas las hojas de interés, obteniendo como resultado un MDT en formato raster de la zona de estudio. El siguiente paso sería el recorte de la imagen, mediante la creación de un shape con el tamaño deseado, con el fin de obtener una zona más aproximada a la cuenca del Albuñón y el ajuste para el contorno de costa, como ya se explicó al comienzo de este estudio.

El resultado de este proceso se puede apreciar en la figura 6.1.

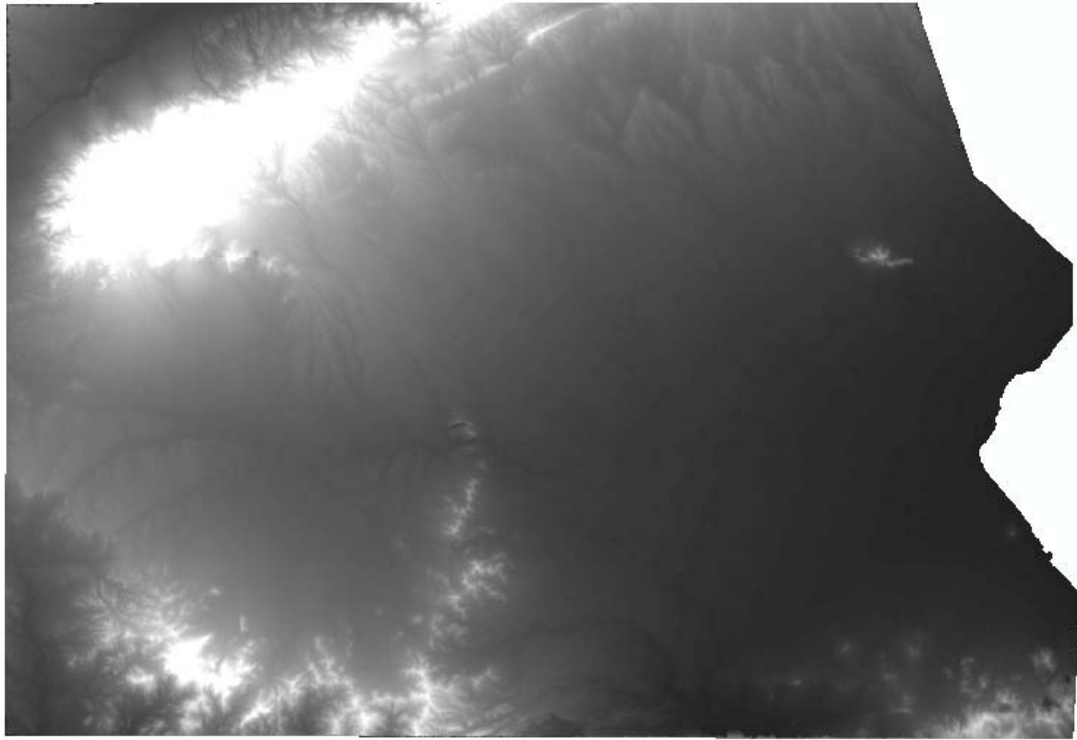


Figura 6.1. Modelo digital del terreno tratado.

Para poder realizar correctamente el procesamiento de cuenca en HEC-GeoHMS es necesario cargar en el programa los siguientes archivos:

- El MDT tratado
- Una malla, obtenida a partir del MDT mediante la conversión de raster a TIN
- Un archivo shape de polígono

Estos tres archivos tendrán que tener el mismo tamaño.

6.3. Preprocesado de cuenca

Una vez que se tienen los archivos necesarios para que el programa HEC-GeoHMS pueda trabajar con normalidad se procede al preprocesado del terreno.

En las siguientes figuras se muestra el MDT primitivo y los resultados del llenado de huecos, de las direcciones de flujo, de la acumulación de flujo así como las cuencas y los cauces obtenidos.

El valor umbral de área aportante elegido para la obtención de los cauces ha sido de 2 Km².

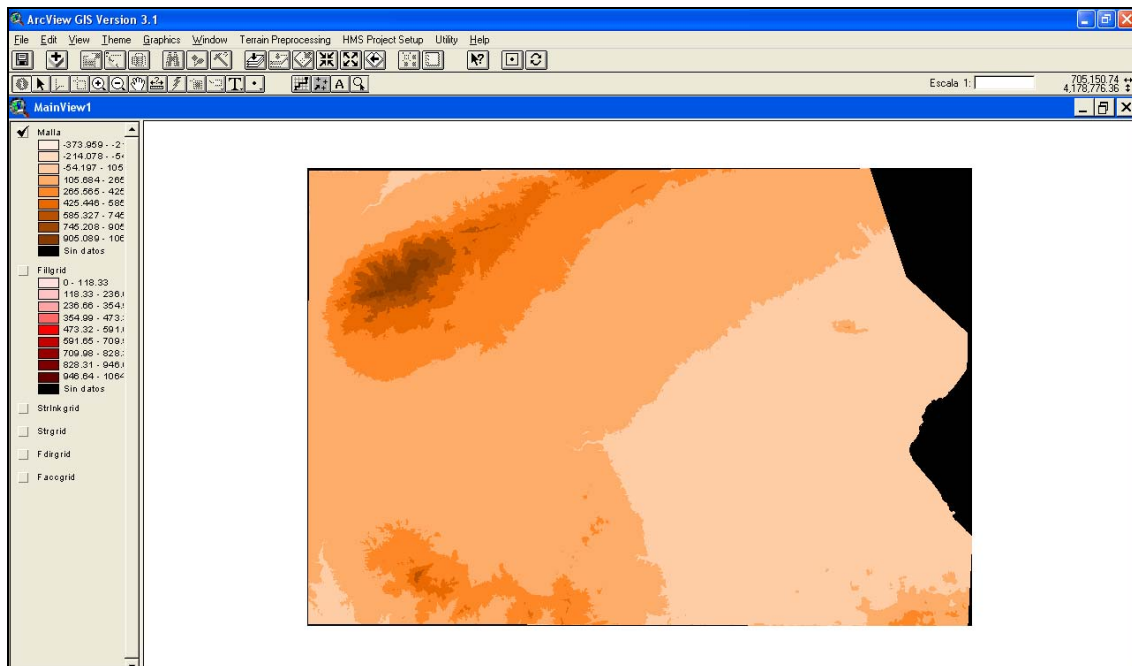


Fig. 6.2. MDE “primitivo”

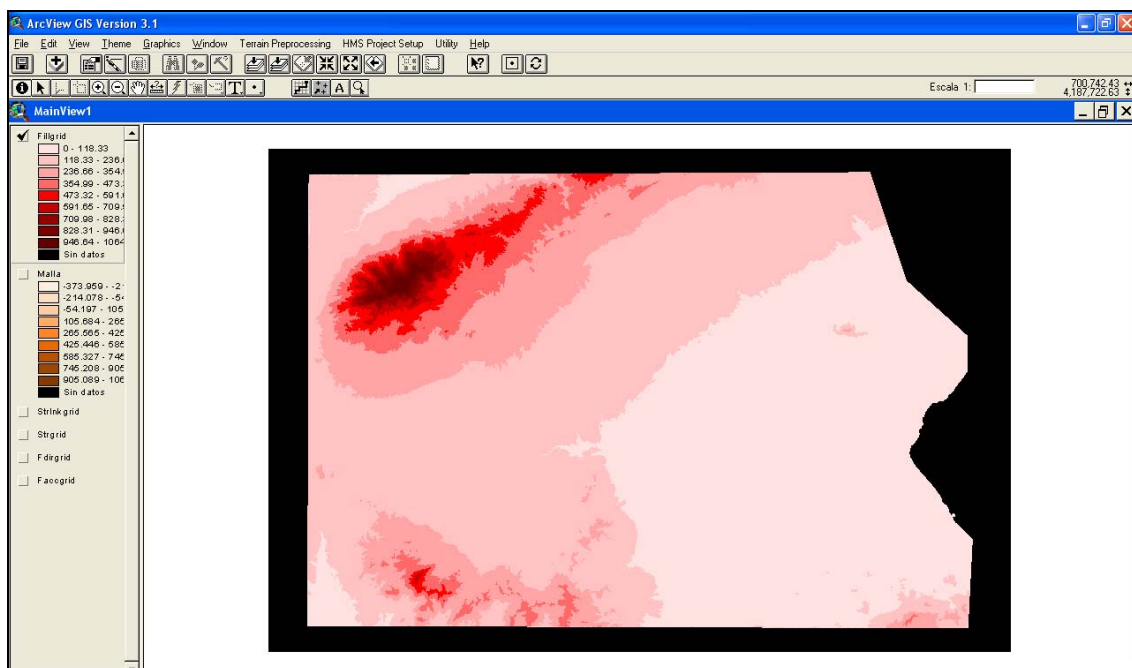
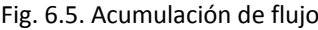
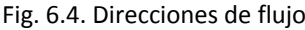


Fig. 6.3. MDE sin huecos



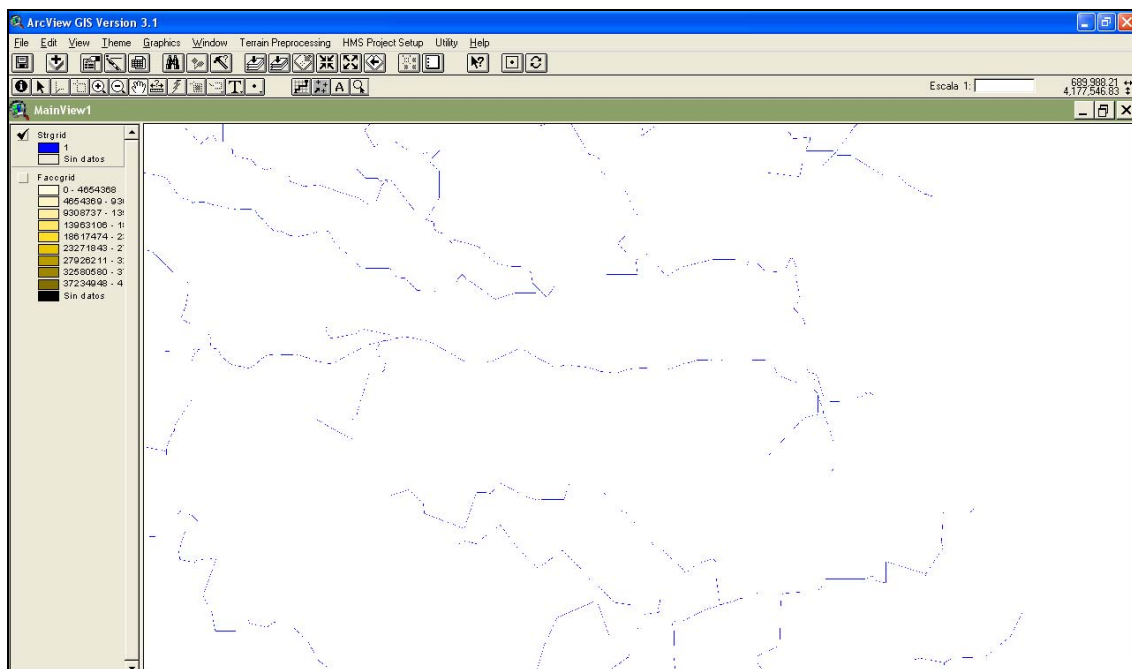


Fig. 6.6. Definición de cauces

Ahora se superpondrá la capa de los cauces a la ortofoto para comprobar que los cauces calculados discurren por donde lo hacen en la realidad y así decidir si será necesario modificar el MDE o no.

Como se puede observar en la siguiente figura, la red de drenaje calculada se ajusta satisfactoriamente a la red real.

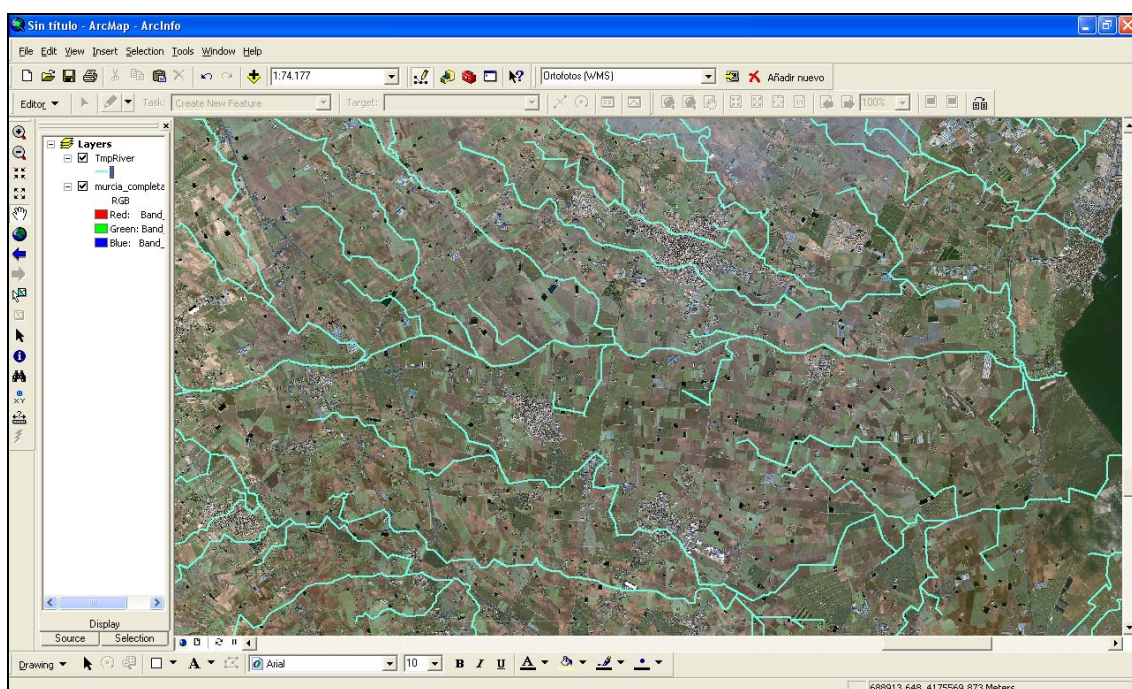


Fig. 6.7. Red de drenaje calculada con el MDE

Para comprobar la fiabilidad de la red calculada se fue observando tramo a tramo del cauce principal y verificando que se correspondía con la red de drenaje real.

En el primer preprocesado del terreno, utilizando el MDE con un tamaño de celda de 10 metros se observó que, en la zona de la desembocadura, la red no se ajustaba al cauce real. También se produjeron problemas en zonas lindantes con carreteras o autopistas, donde el cauce se desviaba erróneamente.

Sin embargo, la precisión del MDE de cuatro metros ha paliado todos estos errores, dando como resultado una red de drenaje que se ajusta perfectamente a la red real, sin tener que modificar en ningún punto el MDE.

Por tanto, una vez verificado que el MDE es correcto, se puede seguir con el preprocesado del terreno.

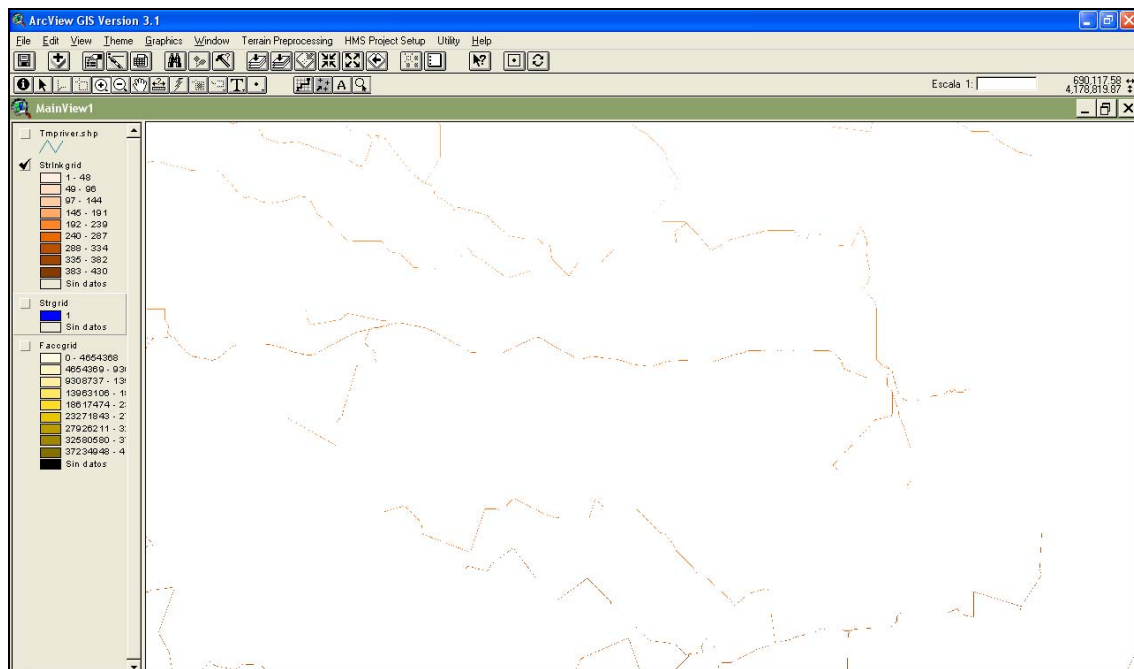


Fig. 6.8. Segmentación del cauce

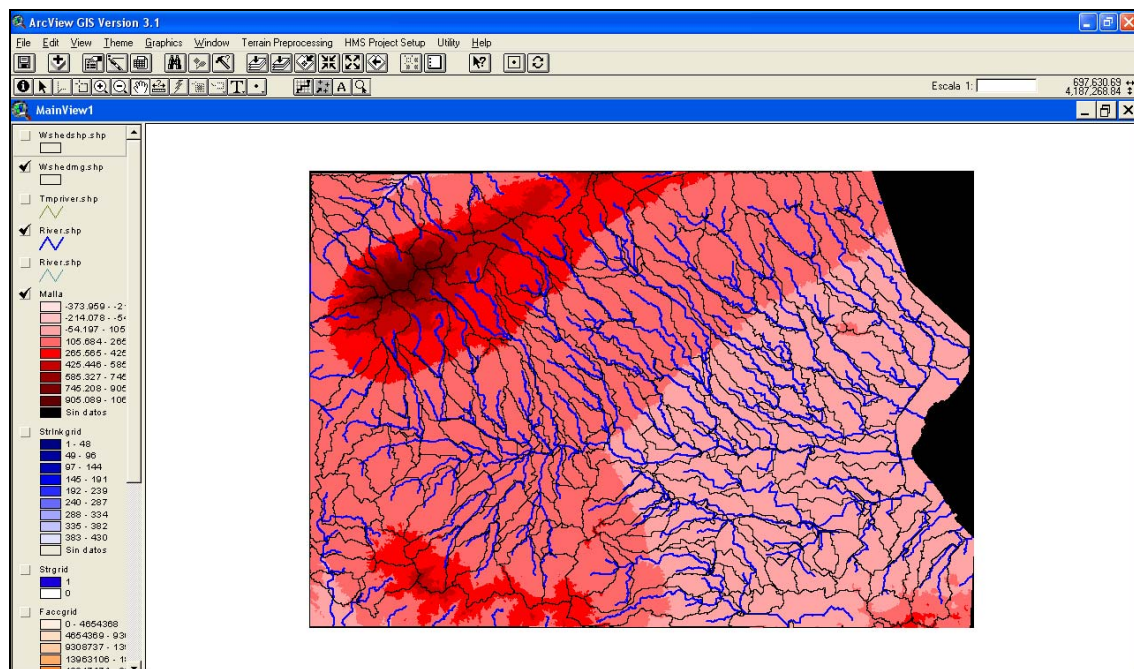


Fig. 6.9. Delineación de cauces y subcuencas

Con todos estos pasos se ha conseguido la extracción de la cuenca, a partir de la cual se creará e proyecto que defina tanto la cuenca como los cauces válidos para su estudio en HEC-HMS.

Una vez completado el menú "Terrain Preprocessing", se ha realizado la extracción de la cuenca de estudio, con el menú "HMS Project Setup". Se ha seleccionado el punto de salida de la cuenca, seleccionando "Original Stream Definition" para que el nuevo proyecto se genere en base al valor umbral para la definición de cauces indicado en el "Stream Definition"

6.4. Procesado de cuenca

Una vez acabado el preprocesado de la cuenca, los datos aparecerán en la ventana de "ProjView".

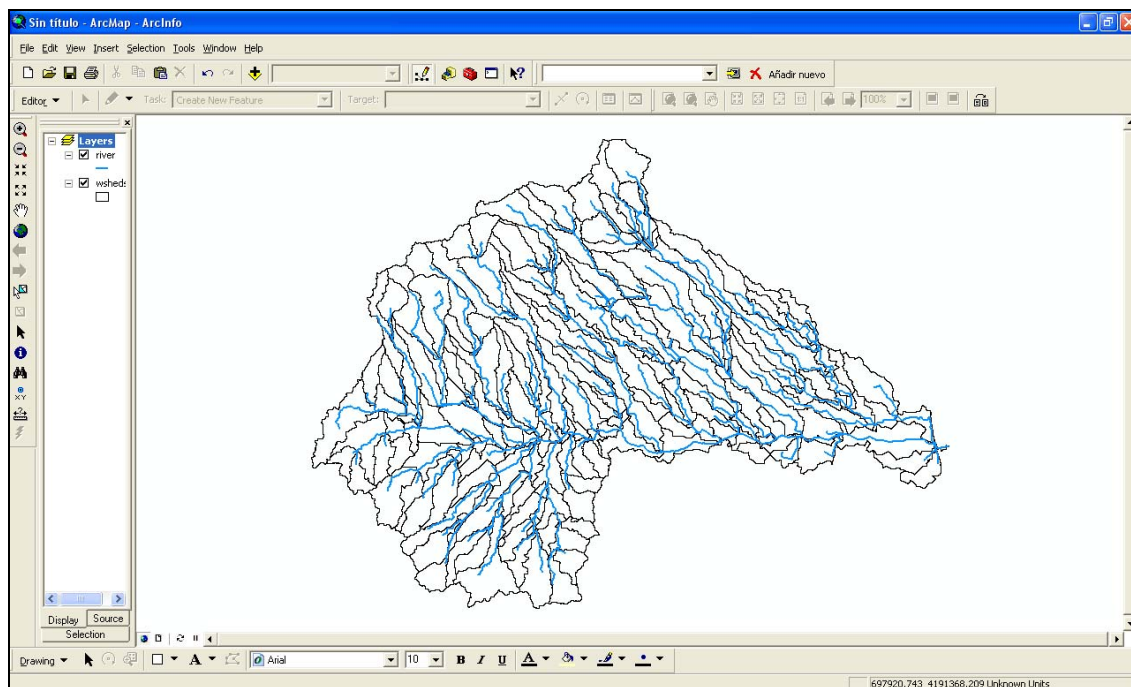


Fig. 6.10. Vista en ArcView una vez extraída la cuenca de estudio

Como se aprecia en la figura anterior hay un elevado número de subcuencas que son innecesarias, ya que no será necesario obtener un caudal para cada una (se obtendrá un valor de caudal para cada punto de unión entre cauces), ni tampoco será necesario perder tanto tiempo en calcular los parámetros hidrológicos de tantas subcuencas. El número de subcuencas se debe a que HEC-GeoHMS ha delineado una subcuenca para cada tramo de río.

Con el procesado de la cuenca se unirán y/o dividirán las subcuencas a criterio del usuario, con el fin de obtener los caudales en aquellos puntos donde se deseen.

En este proyecto se realizará, en primer lugar, un análisis de sensibilidad sobre el tamaño de las subcuencas. Para ello se realizarán los cálculos para dos supuestos:

- Para subcuencas mayores de 100 Km²; en total 18 subcuencas
- Para subcuencas menores de 50 Km²; en total 3 subcuencas

En segundo lugar, un análisis de sensibilidad del método empleado para el cálculo de la transformación lluvia-caudal. Los métodos que se usarán son:

- El método del Soil Conservation Service
- El método de la Onda Cinemática

En ambos casos se calcularán todos los parámetros necesarios para poder obtener los caudales circulantes por la Rambla del Albuñón.

Para la aplicación del método del SCS serán necesarios: tiempo de concentración, número de curva y patrón de precipitación.

En el caso del método de la Onda Cinemática además de los parámetros mencionados anteriormente será necesario establecer un coeficiente de rugosidad y el porcentaje de terreno tanto permeable como impermeable.

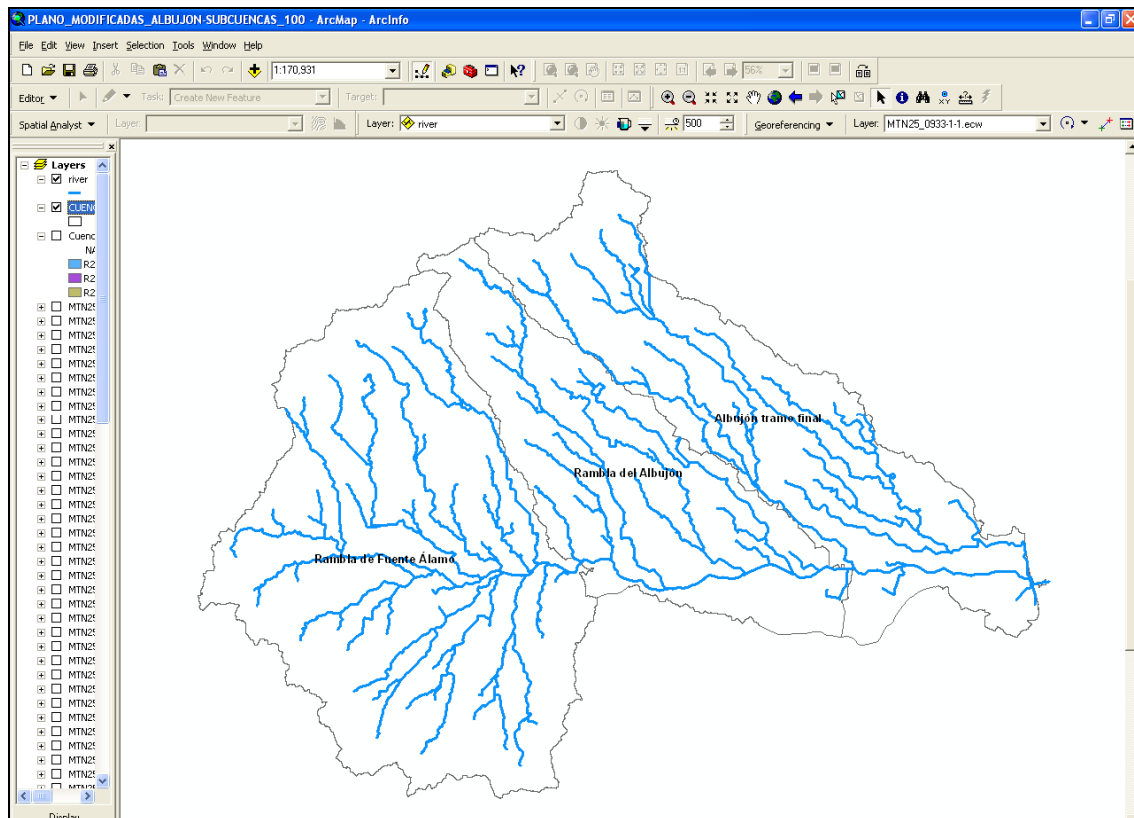


Fig. 6.11. Modelo de cuenca para subcuencas mayores de 100 Km²

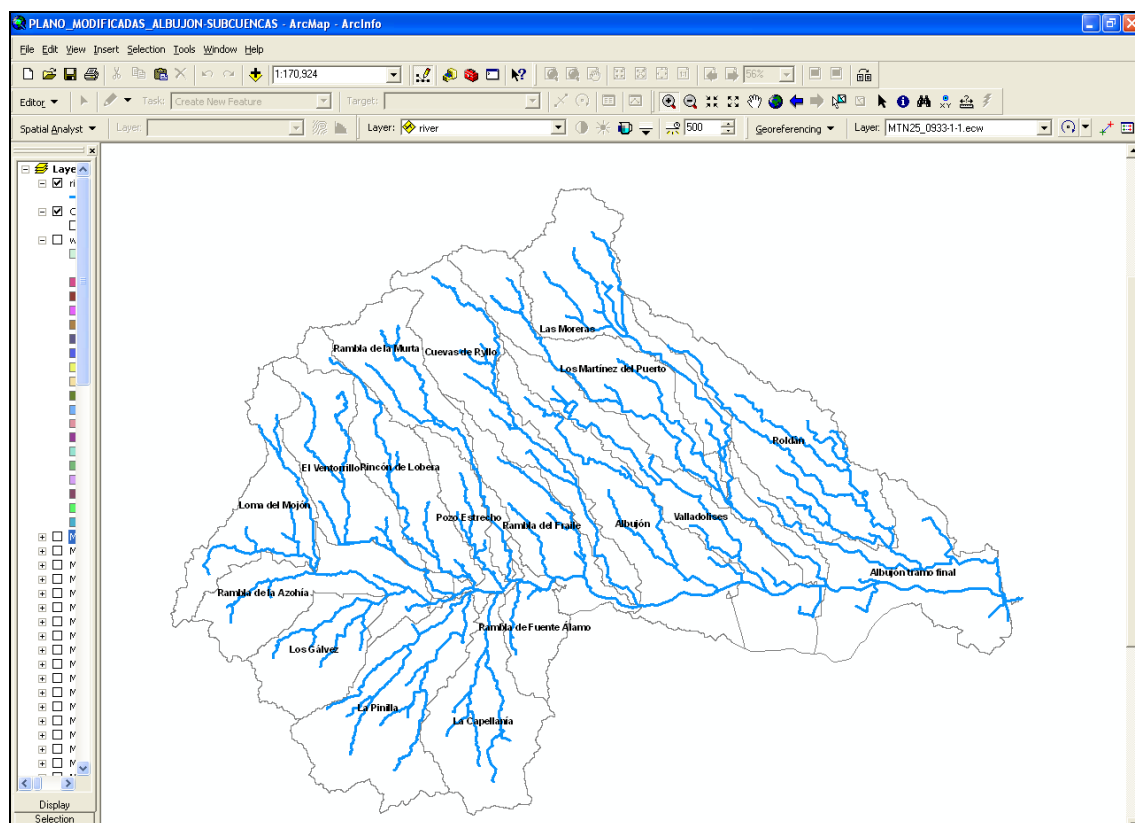


Fig. 6.12. Modelo de cuenca para subcuencas menores de 50 Km²

6.5. Obtención de las características de cauces y subcuencas

Una vez obtenidos los esquemas de la cuenca se obtendrán las características de los cauces y las subcuencas, tanto para la cuenca formada por subcuencas de más de 100 Km², como para la cuenca formada por subcuencas de menos de 50 Km².

Para cada subcuenca hay que determinar el área, la longitud máxima de flujo y sus cotas superior e inferior.

Subcuencas mayores de 100 km ²	Long. máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
Rambla de Fuente Álamo	29,69	321,18	992	101
Rambla del Albuñón	40,26	167,9	624	41,90
Albuñón tramo final	44,79	201,7	590	0

Tabla 6.1. Características físicas de las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas menores de 50 km ²	Long. máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
La Pinilla	11,88	27,28	187,91	148,05
Loma del Mojón	14,13	34,22	306,75	169,98
Los Gálvez	22,03	30,69	232,94	122,84
Cuevas de Ryllo	16,90	37,94	173,08	139,01
El Ventorrillo	22,70	36,06	233,28	126,36
La Capellanía	16,50	52,00	195,09	124,28
Rambla de la Azohía	15,09	39,78	162,00	116,98
Rambla de Fuente Álamo	13,66	15,61	168,38	110,94
Rincón de Lobera	10,67	16,00	134,32	101,00
Rambla de la Murta	22,68	31,60	254,52	113,13
Rambla del Fraile	18,32	28,46	151,15	76,94
Valladolises	29,64	43,37	223,00	76,94
Albujón	25,23	48,29	138,51	56,49
Los Martínez del Puerto	25,49	42,18	195,02	75,00
Pozo Estrecho	27,24	47,79	118,15	41,90
Las Moreras	32,27	52,10	136,84	38,43
Roldán	25,14	52,22	105,45	31,03
Albujón tramo final	23,44	55,21	34,02	0,00

Tabla 6.2. Características físicas de las subcuencas menores de 50 km²

Para los cauces las características a determinar son la longitud, la pendiente, la forma de la sección transversal y el coeficiente de rugosidad. Estas características tendrán que ser calculadas en todos los tramos donde haya que realizar tránsitos.

Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coeficiente rugosidad
R2770	4056,9	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2700	1369,8	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2640	148,3	0,0021	Ocho puntos	0.035
R2610	4292,1	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2530	6991,8	0,0031	Ocho puntos	0.035
R2510	1553,3	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2460	215,6	0,0161	Ocho puntos	0.035
R2440	1701,7	0,0015	Ocho puntos	0.035
R2420	2949,1	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2410	283,5	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2400	1446,8	0,0047	Ocho puntos	0.035
R2390	1623,7	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2240	1769,7	0,0050	Ocho puntos	0.035

Tabla 6.3. Características físicas de los cauces para las subcuencas mayores de 100 km²

Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coefficiente de rugosidad
R2770	4056,9	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2700	1369,8	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2640	148,3	0,0021	Ocho puntos	0.035
R2670	1570,1	0,0081	Ocho puntos	0.035
R2610	4292,1	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2620	1644,9	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2590	1192,8	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2580	1288,2	0,0019	Ocho puntos	0.035
R2570	462,3	0,0071	Ocho puntos	0.035
R2550	296,9	0,0040	Ocho puntos	0.035
R2540	343,0	0,0026	Ocho puntos	0.035
R2530	6991,8	0,0031	Ocho puntos	0.035
R2510	1553,3	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2500	346,1	0,0034	Ocho puntos	0.035
R2490	1028,4	0,0041	Ocho puntos	0.035
R2460	215,6	0,0161	Ocho puntos	0.035
R2440	1701,7	0,0015	Ocho puntos	0.035
R2420	2949,1	0,004	Ocho puntos	0.035
R2410	283,5	0,0026	Ocho puntos	0.035
Tramo	Longitud (m)	Pendiente	Características de la sección	Coefficiente de rugosidad
R2400	1446,8	0,0047	Ocho puntos	0.035
R2390	1623,7	0,0029	Ocho puntos	0.035
R2350	598,2	0,0051	Ocho puntos	0.035
R2330	1245,6	0,0037	Ocho puntos	0.035
R2310	629,3	0,0035	Ocho puntos	0.035
R2300	797,6	0,0051	Ocho puntos	0.035
R2240	1769,7	0,005	Ocho puntos	0.035
R2200	4585,4	0,0048	Ocho puntos	0.035
R2130	4869,6	0,0033	Ocho puntos	0.035
R2120	2053,2	0,0024	Ocho puntos	0.035
R2080	7557,8	0,0048	Ocho puntos	0.035
R2050	2384,5	0,0025	Ocho puntos	0.035

Tabla 6.4. Características físicas de los cauces para las subcuencas menores de 50 km²

Para todos los tramos se ha calculado una sección media de ocho puntos, cuyas dimensiones se aprecian en las siguientes tablas:

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas

Punto XS1	Elevación	Punto XS2	Elevación	Punto XS3	Elevación	Punto XS4	Elevación
0	167	0	148	0	143	0	140
43	166	67,63	147,5	5	142	54,9	139
87,03	165	138,08	147	58,35	141	110,5	138
111,84	164	204,3	146,5	282,85	141	501,2	137
149,9	164	273,81	146	325,65	142	639,9	137
153,05	165	581,91	146	355,45	143	672,17	138
157,02	166	593,18	146	360,26	144	673,53	139
160,12	167	666,45	145	364,92	145	675,26	140

Punto XS5	Elevación	Punto XS6	Elevación	Punto XS7	Elevación	Punto XS8	Elevación
0	133	0	129	0	124	0	122
11,14	129	23,52	125	18,44	123	7,78	120
15,38	127	35	123	22,04	122	10,94	119
20,26	126	42,9	122	25,44	121	14,08	118
25,46	125	49,16	121	27,59	120	16,97	117
43,66	126	52,26	122	59,79	120	49,15	116
46,86	127	64,26	126	63,01	121	60,93	121
58,26	131	85,16	128	71,11	123	80,22	133

Punto XS9	Elevación	Punto XS10	Elevación	Punto XS11	Elevación	Punto XS12	Elevación
0	121	0	122	0	117	0	112
22,54	118	26,6	120	76,24	116	12,49	107
27,04	116	47,4	114	101,84	109	29,97	106
47,84	115	51,29	113	104,43	108	48,17	105
68,54	114	55,17	112	124,61	107	55,48	106
70,54	115	110,67	113	128,64	108	62,78	107
95,94	124	147,37	114	137,43	111	70,48	108
143,02	125	156,78	118	157,22	110	86,58	110

Punto XS13	Elevación	Punto XS14	Elevación	Punto XS15	Elevación	Punto XS16	Elevación
0	110	0	115	0	92	0	76
52,7	109	23,1	102	25,6	87	97,6	75
75	108	33,8	99	48,5	85	104,93	72
78,68	106	49,85	97	60,75	84	109,65	70
83,76	102	58,12	96	74,07	83	140,8	70
86,08	102	71,98	96	166,07	83	143,11	71
101,58	103	76,35	97	182,57	84	150,95	75
142,8	106	110,85	98	212,97	88	208,75	75

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas

Punto XS17	Elevación	Punto XS18	Elevación	Punto XS19	Elevación	Punto XS20	Elevación
0	63	0	56	0	52	0	44
2,26	62	2,57	55	3,24	51	4,12	43
4,1	60	7,66	53	6,44	50	8,13	42
7,3	59	10,36	52	9,54	49	12,25	41
13,7	58	12,88	53	12,7	48	16,14	40
17,28	59	15,32	54	18,8	49	20,15	41
20,1	60	20,17	56	26,83	52	27,37	43
44,57	63	22,63	57	44,33	53	30,69	44

Punto XS21	Elevación	Punto XS22	Elevación	Punto XS23	Elevación	Punto XS24	Elevación
0	42	0	36	0	30	0	8
5,22	41	4,58	35	1,83	29	13,4	8
10,59	40	6,95	34	3,66	28	25,97	8
17,33	39	8,99	33	5,49	27	35,24	7
23,25	40	11,53	33	7,86	26	52,35	6
26,61	41	14,88	34	17,45	27	64,92	6
29,7	42	18,15	35	22,98	28	75,84	7
47,52	43	25,02	36	24,53	29	83,88	8

Punto XS25	Elevación	Punto XS26	Elevación	Punto XSD1	Elevación	Punto XSB1	Elevación
0	6	0	4	0	130	0	67
9,29	6	9,07	4	9,45	127	4,72	65
46,47	6	12,04	3	16,11	124	7,31	64
55,1	5	14,7	2	21,5	123	10,08	63
65,06	4	48,94	2	30,7	123	26,4	63
70,7	5	51,6	3	35,3	124	29,3	65
78	6	54,1	4	38,59	125	35	67
85,97	7	63,79	4	45,12	127	39,39	68

Punto XSC1	Elevación	Punto XSC2	Elevación	Punto XSC3	Elevación
0	32	0	23	0	5
40	31	43,5	22	5,7	6
49	30	67,19	22	15,8	6
55	29	83,1	23	25	5
96	29	149,4	23	34	4
117	30	161,99	22	35,8	4
128	31	458,3	22	43,57	5
139	32	551,5	23	46,61	6

Tabla 6.5. Dimensiones de las secciones de los tramos

6.6. Obtención de los parámetros hidrológicos

Los parámetros hidrológicos a determinar son el tiempo de concentración y los Números de Curva.

6.6.1. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (t_c) para cada subcuenca se ha calculado con la fórmula de Témez, obteniendo a continuación el tiempo lag o de retraso, en minutos, correspondiente a 0,6 veces el tiempo de concentración y necesario para realizar la transformación precipitación escurrimiento con el hidrograma adimensional del SCS.

Subcuencas	Long. Máxima de flujo (km)	Área (km ²)	Pendiente	TÉMEZ	
				Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
Rambla de Fuente Álamo	29,69	321,18	0,030	7,68	138,36
Rambla del Albuñón	40,26	167,9	0,014	11,19	201,55
Albuñón tramo final	44,79	201,7	0,013	12,31	221,65

Tabla 6.6. Tiempo de concentración y tiempo lag para las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas	Cota superior (m)	Cota inferior (m)	Long. máxima de flujo (km)	Pendiente	TÉMEZ	
					Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
La Pinilla	187,91	148,05	11,888	0,012	4,56	95,80
Loma del Mojón	306,75	169,98	14,132	0,058	3,85	80,99
Los Gálvez	232,94	122,84	22,034	0,043	5,72	120,15
Cuevas de Ryllo	173,08	139,01	16,909	0,006	6,80	142,84
El Ventorrillo	233,28	126,36	22,702	0,022	6,64	139,60
La Capellanía	195,09	124,28	16,507	0,033	4,83	101,44
Rambla de la Azohía	162,00	116,98	15,099	0,023	4,83	101,53
Rambla de Fuente Álamo	168,38	110,94	13,660	0,017	4,74	99,65
Rincón de Lobera	134,32	101,00	10,673	0,015	4,02	84,60
Rambla de la Murta	254,52	113,13	22,689	0,030	6,26	131,55
Rambla del Fraile	151,15	76,94	18,326	0,012	6,33	133,11
Valladolises	223,00	76,94	29,649	0,018	8,45	177,65
Albuñón	138,51	56,49	25,231	0,009	8,53	179,26
Los Martínez del Puerto	195,02	75,00	25,492	0,020	7,39	155,24
Pozo Estrecho	118,15	41,90	27,241	0,010	8,86	186,25

					TÉMEZ	
Subcuencas	Cota superior (m)	Cota inferior (m)	Long. máxima de flujo (km)	Pendiente	Tiempo de concentración (h)	Tiempo lag (min)
Las Moreras	136,84	38,43	32,273	0,017	9,12	191,54
Roldán	105,45	31,03	25,144	0,008	8,70	182,84
Albujón tramo final	34,02	0,00	23,444	0,005	9,02	189,56

Tabla 6.7. Tiempo de concentración y tiempo lag para las subcuencas menores de 50 km²

6.6.2. Números de curva

Para la obtención de los números de curva se ha utilizado el método propuesto por la publicación del CEDEX.

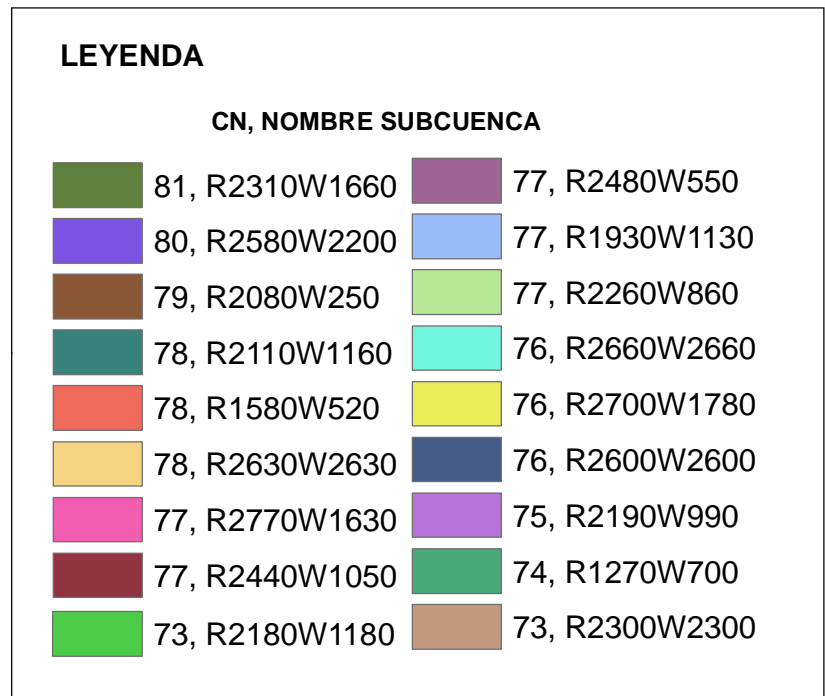
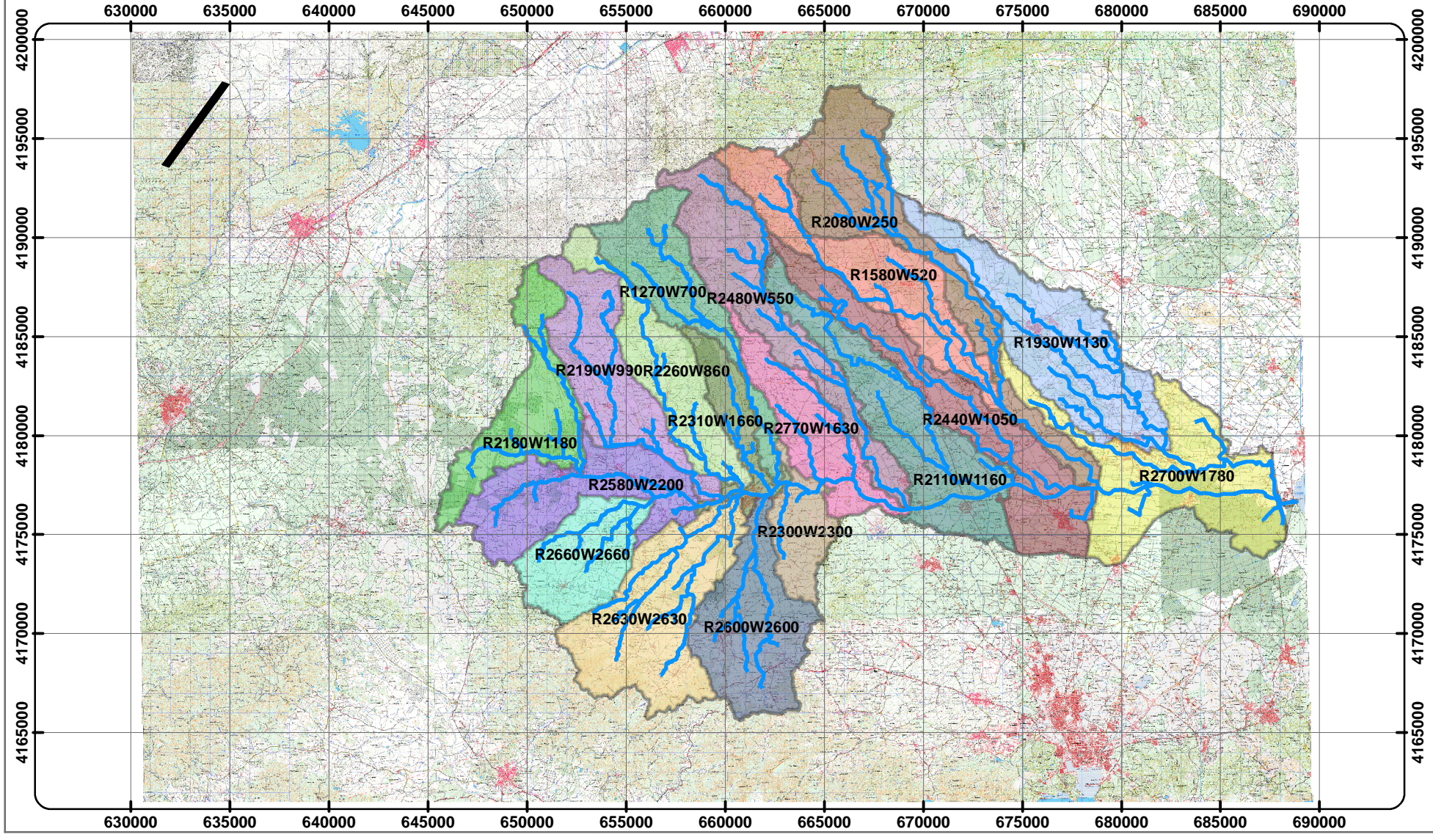
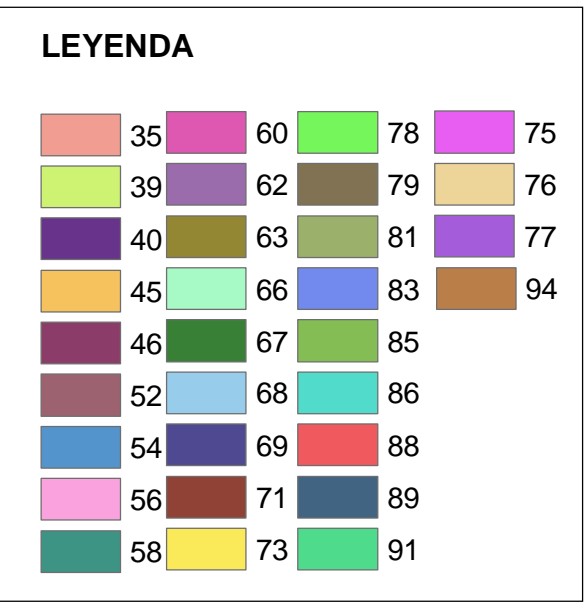
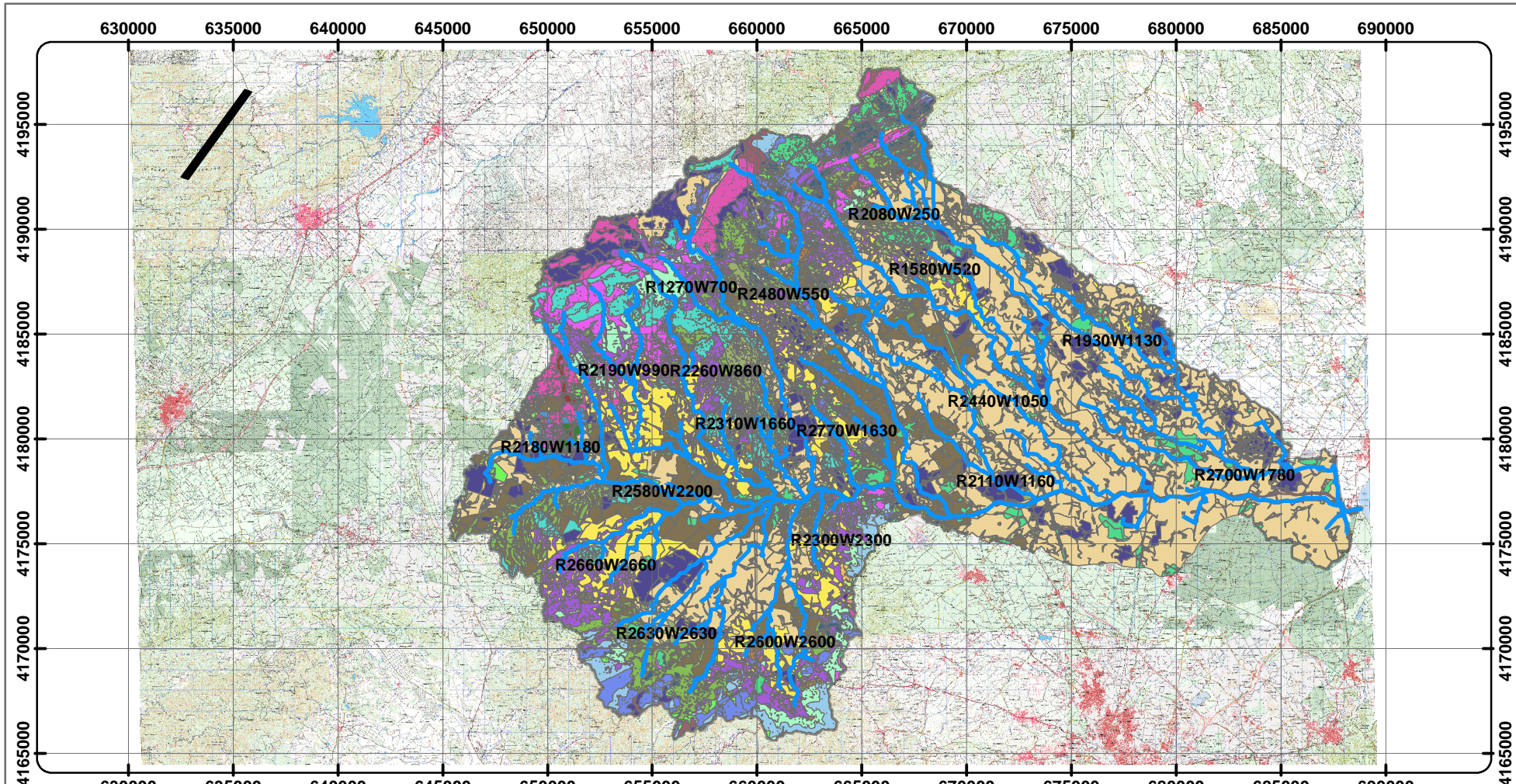
Este parámetro es necesario para el cálculo con los dos métodos a utilizar: SCS y Onda Cinemática.

En las siguientes tablas se muestran los números de curva asignados a cada subcuenca:

Subcuencas mayores de 100 km ²	CN
Rambla de Fuente Álamo	76
Rambla del Albujón	77
Albujón tramo final	76

Tabla 6.8. Números de curva para las subcuencas mayores de 100 km²

La representación gráfica de los números de curva es la siguiente:



Subcuencas menores de 50 km ²	CN
La Pinilla	76
Loma del Mojón	73
Los Gálvez	77
Cuevas de Ryllo	80
El Ventorrillo	75
La Capellanía	78
Rambla de la Azohía	76
Rambla de Fuente Álamo	81
Rincón de Lobera	73
Rambla de la Murta	74
Rambla del Fraile	77
Valladolises	77
Albujón	78
Pozo Estrecho	77
Los Martínez del Puerto	78
Las Moreras	79
Roldán	77
Albujón tramo final	76

Tabla 6.9. Números de curva para las subcuencas menores de 50 km²

6.6.3. Coeficiente de rugosidad

Los coeficientes de rugosidad (n), tanto para flujo en lámina libre como el flujo en canales cerrados se calcula en función de la superficie de la cubierta, usando, por ejemplo, la tabla 6.10., para el flujo en lámina libre y las tablas de Chow (1959) y otros textos para los valores n de canales.

Surface Description	N
Smooth surfaces (concrete, asphalt, gravel, or bare soil)	0.011
Fallow (no residue)	0.05
Cultivated soils:	
Residue cover < 20%	0.06
Residue cover > 20%	0.17
Grass:	
Short grass prairie	0.15
Dense grasses, including species such as weeping love grass, bluegrass, buffalo grass, blue grass, and native grass mixtures	0.24
Bermudagrass	0.41
Range	0.13
Woods:	
Light underbrush	0.40
Dense underbrush	0.80

Tabla 6.10. Coeficientes de rugosidad para el modelado del flujo (USACE 1998)

Estos coeficientes son necesarios para el cálculo con el método de la Onda Cinemática.

En función de la tabla anterior se ha considerado un coeficiente de 0,011 para terrenos impermeables. Según la tabla este valor se corresponde con superficies lisas como el suelo desnudo. La mayor parte de la superficie se considera impermeable por lo que este coeficiente es el más abundante.

Para los terrenos permeable los coeficientes de rugosidad elegidos varían entre 0,17 para terrenos con una cobertura de residuos mayor del 20% y 0,06 en el caso de suelos con menos de 20% de residuos, entendiéndose como residuos, vegetación.

Como se comentó anteriormente para llevar a cabo el cálculo con el método de la Onda Cinemática también es necesario introducir en el modelo el porcentaje de zona impermeable existente en cada subcuenca. Debido a que la información cartográfica de usos de suelo no está actualizada y no recoge los cambios producidos por el aumento de carreteras, urbanizaciones, etc., se ha estimado para este estudio un porcentaje mínimo para toda la cuenca del 5%, que se ha incrementado en aquellas zonas donde era necesario. Para esta estimación se han hecho uso de los planos de usos de suelo de la cuenca.

6.7. Obtención del modelo de cuenca de HEC-HMS

Obtenidos los parámetros hidrológicos se ha creado el esquema de HEC-HMS y se han exportado los datos de HEC-GeoHMS a HEC-HMS, mediante el menú “HMS” de GeoHMS.

Para llevar a cabo este proceso el programa crea un nuevo proyecto que será el que se cargue en HEC-HMS. Para ello, se elige *File > Import > Basin Model* y se selecciona el archivo con extensión “.basin”. Para añadir el mapa de fondo hay que seleccionar *View > Background Maps* y elegir el archivo con extensión “.map” con igual nombre que el archivo de cuenca.

El resultado una vez añadido el modelo de cuenca y el mapa de fondo es el siguiente:

6.8. Modelo meteorológico

Para la construcción del modelo meteorológico es necesario determinar la precipitación máxima diaria de cálculo para cada periodo de retorno y elegir un patrón de distribución temporal para esa precipitación.

6.8.1. Precipitación máxima diaria

Para el cálculo de la precipitación máxima diaria se han tomado las series de datos correspondientes a las estaciones cercanas a la zona de estudio como son:

Ind	Nombre
7020	Murcia (Corvera)
7023	Fuente Álamo C.H.
7023 A	Fuente Álamo S.E. Agraria
7024	Valladolises
7024 J	Fuente Álamo (Balsapintada)
7025	Murcia (Los Martínez del Puerto)
7026	Cartagena (Pozo Estrecho)
7026 U	Torre-Pacheco C.C.A.
7005	Mazarrón
7011	Cartagena H.E.
7014	Cartagena Esc. Bastarache
7016	Cartagena (El Algar)
7028	Los Alcázares Aeródromo
7028I	Torre-Pacheco (Torreblanca)
7227	Alhama (Comarza)
7229	Murcia El Sequen
7229A	Murcia (El Valle)
7013	Cartagena Puerto

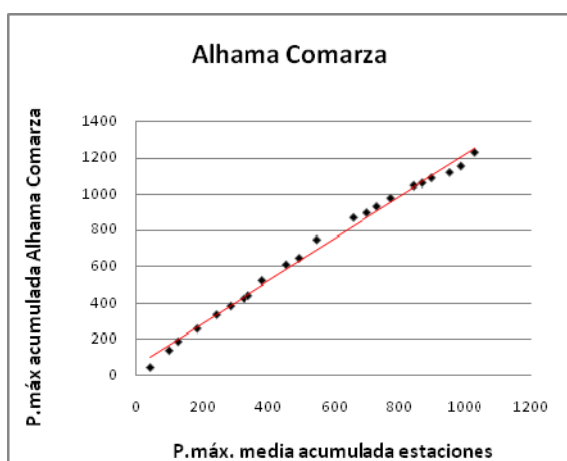
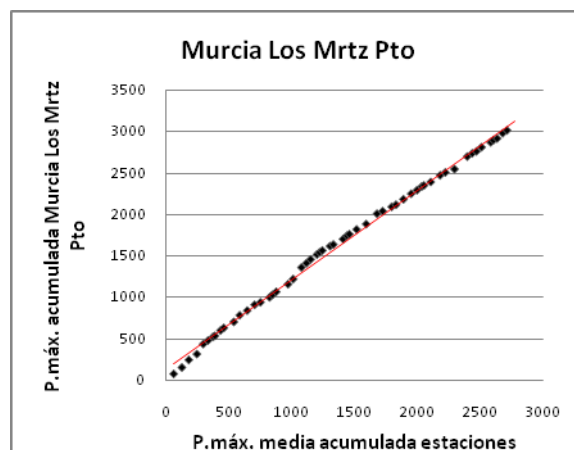
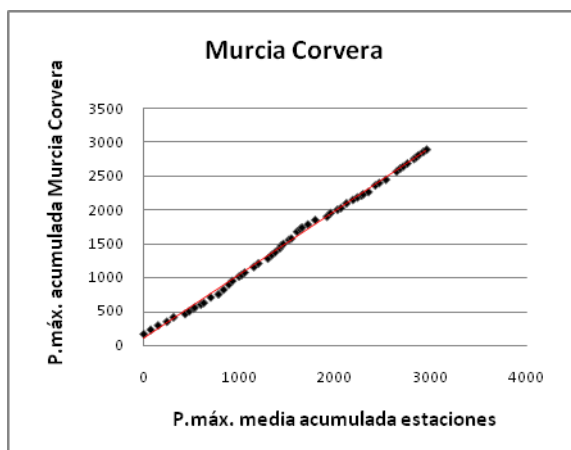
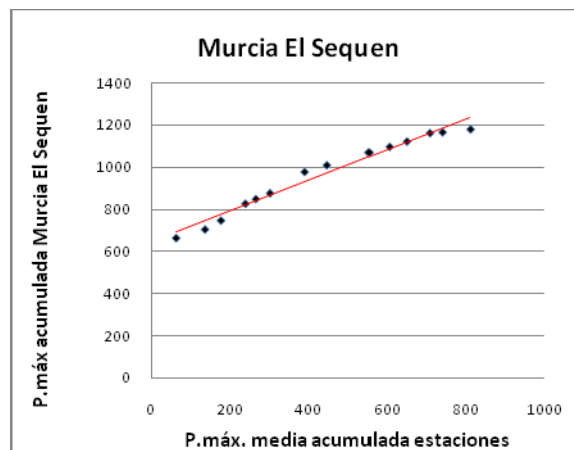
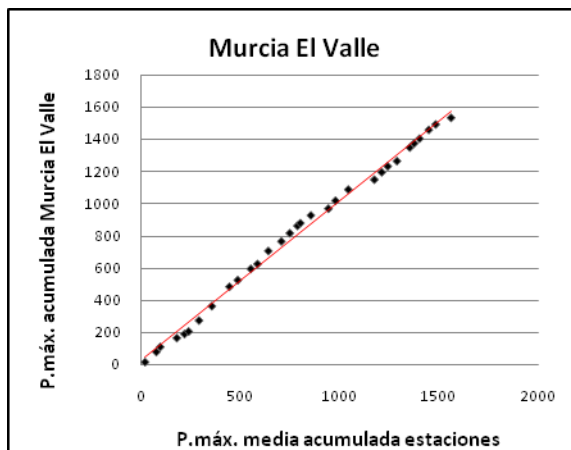
Tabla 6.11. Identificación de las estaciones cercanas a la zona de estudio

6.8.1.1. *Análisis de los datos de las estaciones pluviométricas*

En primer lugar se ha realizado un análisis de la consistencia de los datos con la finalidad de verificar que las condiciones de medida de los datos no han variado a lo largo del tiempo ni del espacio. Para ello se ha propuesto el Método de las Dobles Masas. Para llevar a cabo este análisis, se han dividido las estaciones en tres grupos basándonos en la semejanza de altitud y distancia entre las mismas, y se ha comprobado cada una de las estaciones con el acumulado del grupo al que pertenece. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

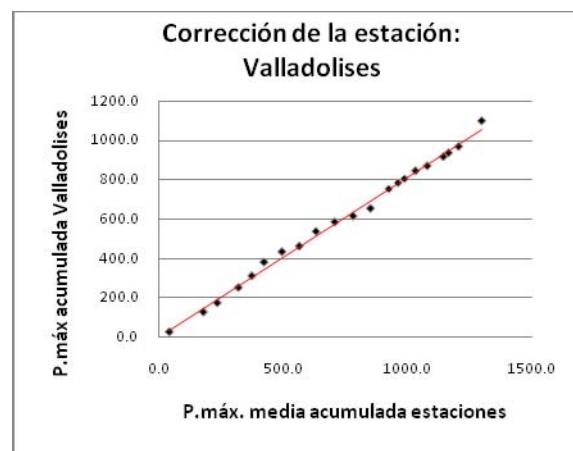
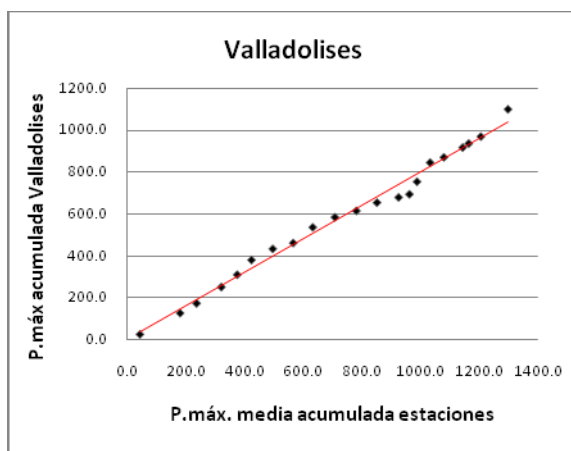
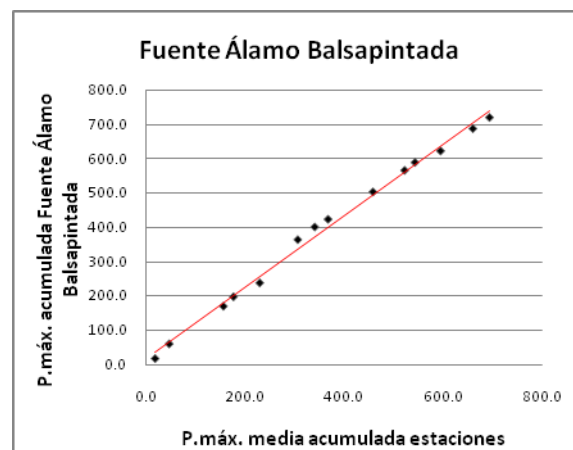
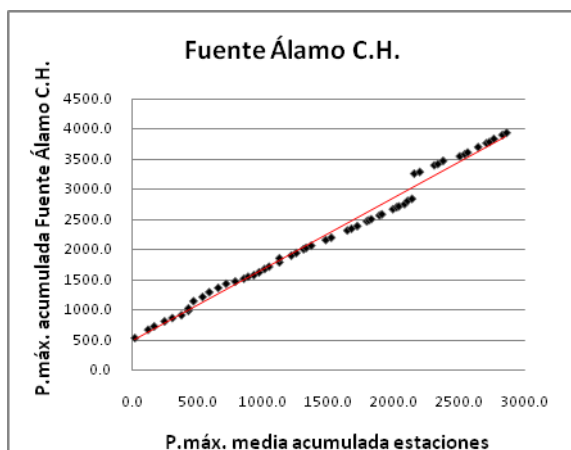
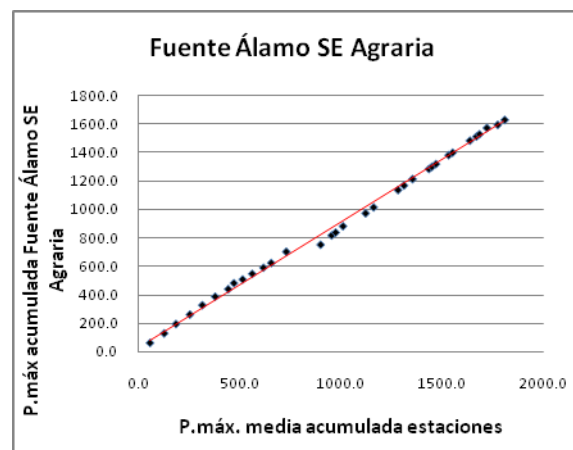
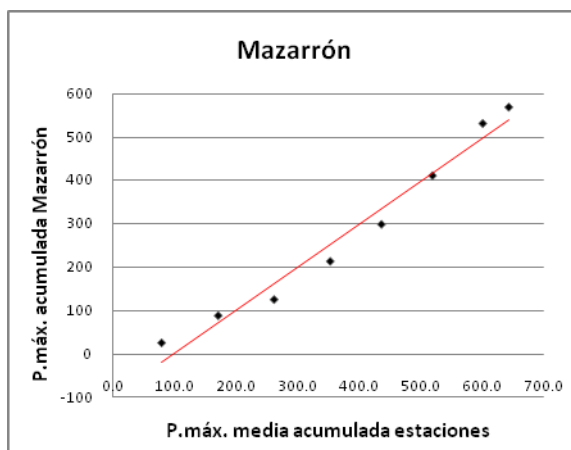
Grupo 1:

Formado por las estaciones de: Alhama (Comarza), Murcia (El Valle), Murcia El Sequen, Murcia (Corvera) y Murcia (Los Martínez del Puerto)



Grupo 2:

Formado por las siguientes estaciones: Valladolides, Fuente Álamo (Balsapintada), Fuente Álamo S.E.Agraria, Fuente Álamo C.H. y Mazarrón

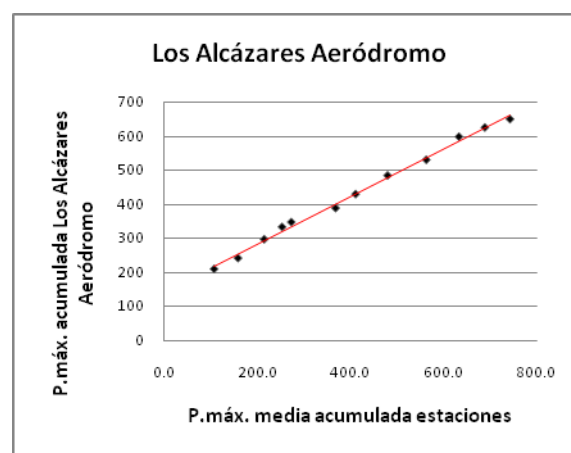
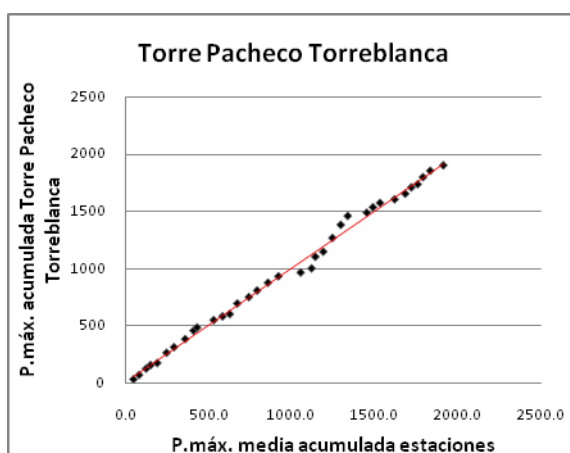
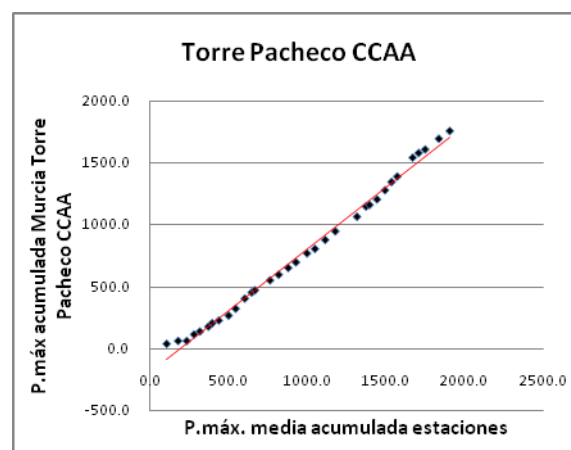
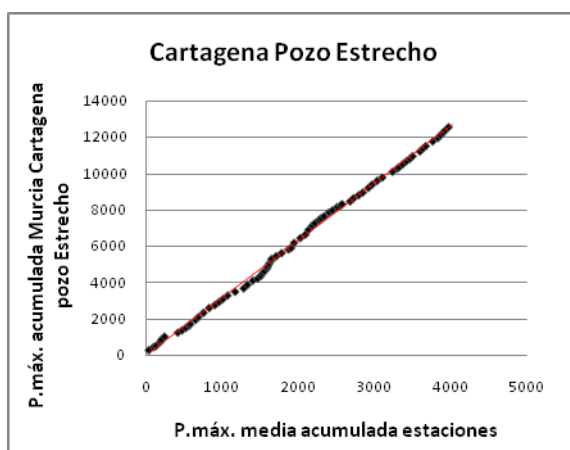


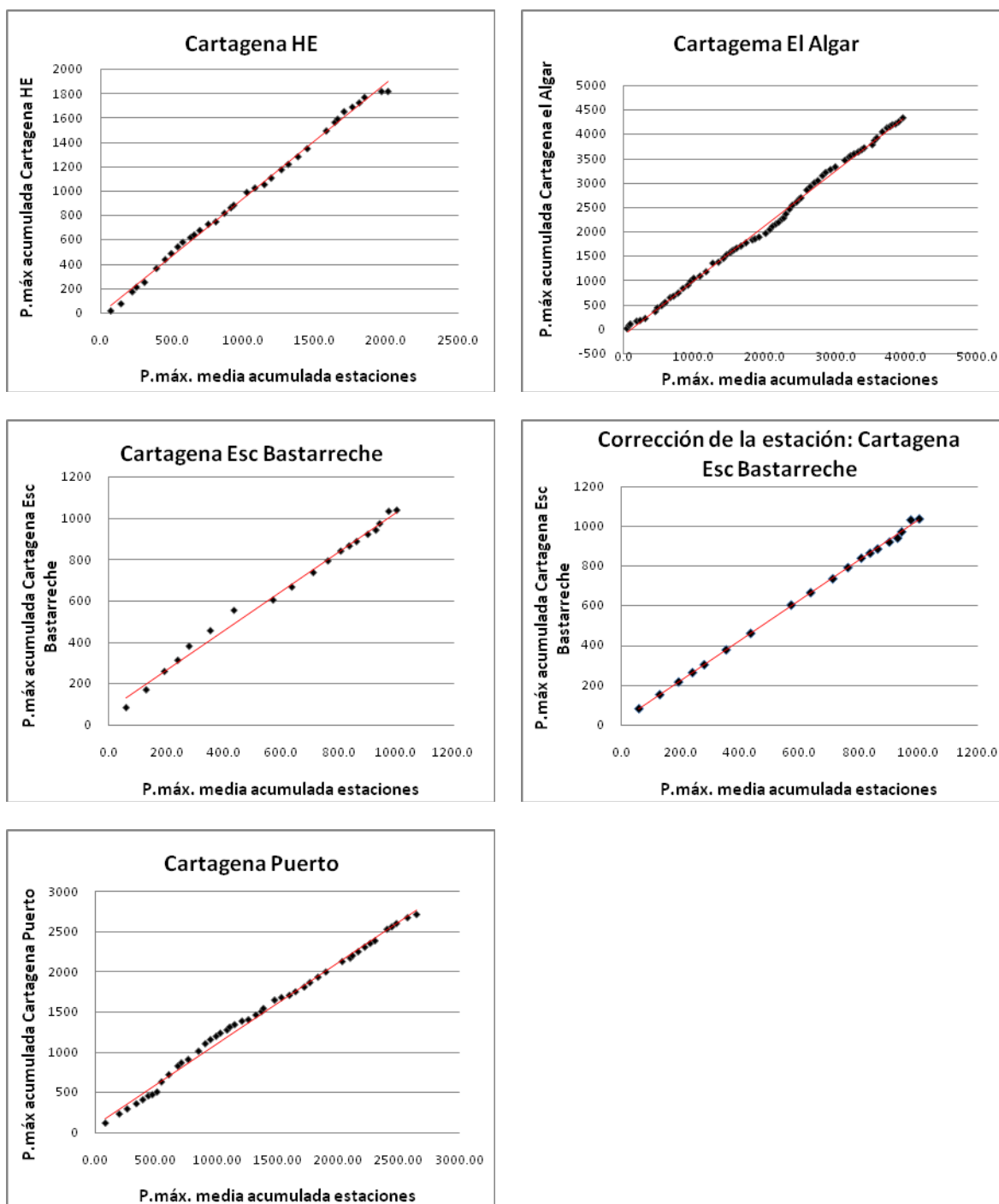
En la estación de Valladolides se puede comprobar que el ajuste de los datos es un tanto deficiente en la recta final de la serie. Para paliar este error se han modificado los datos que no se ajustan correctamente a la línea de tendencia. Para ello se ha modificado el ángulo de los puntos afectados, obteniendo como resultado la corrección de dicha estación.

En el caso de las estaciones de fuente Álamo C.H. y Fuente Álamo SE Agraria, no será necesario corregir los datos ya que la serie de datos se aleja levemente de la línea de tendencia pero vuelve a tomar la misma dirección.

Grupo 3:

Formado por: Cartagena H.E., Cartagena Esc. Bastarreche, Cartagena (El Algar) y Cartagena Puerto, Torre-Pacheco (Torreblanca), Torre-Pacheco C.C.A., Cartagena (Pozo Estrecho) y Los Alcázares Aeródromo.





En el caso de la estación Cartagena Esc. Bastarreche, se detectó una anomalía en el tramo inicial de la serie de datos, lo que se solventó con la rectificación de los datos erróneos modificando sus ángulos con respecto a la línea de tendencia, al igual que en el caso de la estación Valladolides del grupo 2.

Por tanto, los datos de precipitaciones máximas diarias utilizados en este estudio son:

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas

Años	Murcia (El Valle)	Murcia (El Sequen)	Murcia Corvera	Murcia (Los Mrtz Pto.)	Alhama (Comarza)	Mazarrón	Fuente Álamo S.E.Agraria	Fuente Álamo C.H.	Fuente Álamo Balsapintada	Valladolises
1933								69,0		
1934								28,0		
1935								50,3		
1936								27,8		
1937								20,2		
1938								54,1		
1939								33,0		
1940								38,3		
1941								25,1		
1942								39,3		
1943								57,3		
1944		65						51,3		
1945		17						42,8		25,2
1946		88						136,5		101,2
1947		76						56,2		46,5
1948		125						84,2		78,0
1949		62						54,2		59,0
1950		70						48,3		70,0
1951		115						72,4		53,0
1952								41,2		
1953			172,0			26,7	63,0	118,7		28,0
1954			64,3	72,0		62,7	67,0	71,2		75,0
1955			64,0	78,0		37	66,0	79,0		
1956			55,0	91,0		88	66,5	71,4		48,1
1957			65,0	70,0		85	66,0	68,0		30,5
1958			50,0	121,0		112	60,0	38,1		39,0
1959			39,0	42,6		120	53,0	47,4		98,6
1960			39,0	44,4		37,5	42,0	32,3		30,5
1961			16,0	12,0			26,5	25,3		21,2
1962			45,0	65,4			39,0	47,3		
1963			25,0	30,0			43,5	55,2		
1964			80,0	72,6			33,0	38,5		
1965			47,0	80,4			79,0	74,3		
1966		51	68,0	56,0			0,0	66,3		
1967		41	77,0	70,0				44,2		40,6
1968		42	52,0	30,0			49,5	44,2		25,3
1969		80	65,0	60,0			65,8	63,0		46,5
1970		22	23,0	30,0			20,0	20,5		19,2
1971		27,5	35,0	37,0			44,5	38,0		33,2
1972		101	85,0	92,0			91,0	94,0		130,0
1973		32	51,0	62,0			42,0	39,0		

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas

Años	Murcia (El Valle)	Murcia (El Sequen)	Murcia Corvera	Murcia (Los Mrtz Pto.)	Alhama (Comarza)	Mazarrón	Fuente Álamo S.E.Agraria	Fuente Álamo C.H.	Fuente Álamo Balsapintada	Valladolises
1974		60	72,0	140,0			122,0	120,0		
1975		27	52,0	51,0			32,2	30,0		
1976		25	41,0	47,0			44,2	42,0		
1977		40	60,0	58,0			71,3	80,0		
1978		4	38,0	26,0			15,6	15,0		
1979	20		25,0	22,5			19,3	20,0		
1980	63		61,0	52,0			62,9	63,0		
1981	31		20,0	20,0			17,5	19,0		
1982	55		101,0	65,0			84,5	85,0		
1983	25		36,0	41,0			28,7	32,0		
1984	16		24,0	18,0			16,2	15,0		
1985	68		46,0	58,0			44,0	37,0		
1986	89		65,0	64,0			22,5	53,0		
1987	120		51,0	126,0			34,0	35,0		
1988	41		54,0	30,0	41,5			63,0		
1989	70		49,0	52,4	95			82,0		
1990	30		25,0	26,0	50			26,5		
1991	81	14	70,0	65,0	70			59,0		
1992	59		50,0	67,5	78			46,0		
1993	51		36,0	42,0	48			81,0		
1994	46		30,0	45,0	42			44,5		
1995	16,5		16,0	12,0	16			17,0	16,3	
1996	48		35,0	42,0	80			28,5	42,7	
1997	42		97,0	80,0	88			110,0	110,0	
1998	49		35,0	35,0	37			20,5	27,7	
1999	69,5		50,0	40,0	103			53,0	40,6	
2000	61		119,0	152,0	122			77,0	126,5	
2001	46		45,0	38,0	27			34,6	37,0	
2002	37		30,0	24,5	35			27,0	22,5	
2003	32		45,0	49,0	46			91,0	79,8	
2004	84		68,0	59,0	67			64,0	63,2	
2005	25,5		24,0	27,0	14			21,0	23,3	
2006	29,5		33,0	20,0	28			52,0	33,2	
2007	54,5		47,0	63,0	30			65,5	65,5	
2008	33,7		34,0	35,0	36			33,5	32,4	
2009	41				77					

Tabla 6.12. Precipitaciones máximas diarias para las estaciones pertenecientes al grupo 1 y 2.

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas

Años	Cartagena Pozo Estrecho	Torre Pacheco C.C.A.	Los Alcázares Aeródromo	Torre Pacheco Torreblanca	Cartagena H.E.	Cartagena Esc. Bastarreche	Cartagena el Algar	Cartagena Puerto
1933	74							
1934	27,5							
1935	65,4						29	
1936	32						61,4	
1937	20,2						29,3	
1938	93						58,2	
1939	56						16,2	
1940	57						40,3	
1941	69		210				140,3	
1942	56		32				75,3	
1943	33		55,4				47,3	
1944	36		36				45	
1945	102		14,4				19	
1946	44,5		41,4				98	
1947	120		40,9				30	
1948	115		55			81,2	65	
1949	78		46			70,7	95	
1950	28,2		68			64,0	66	
1951	48		27			47,1	80	
1952	38,2		24,5			39,9	58	
1953	31					74,8	46	
1954	49					83,3	90	112,8
1955	55,3					143,2	175	113,8
1956	27,1					62,5	20	62
1957	62,3					70,0	80	65,7
1958	56,3					56,5	75	49,6
1959	47					47,5	40	47
1960	60,2					25,0	35	15,6
1961	66,7					21,0	20	
1962	27,2					35,0	36	33,7
1963	90					20,0		0
1964	123					31,5		0
1965	45					60,0		0
1966	55					5,0		0
1967	48				15,8		46	126
1968	35,2				58,4		63,5	90
1969	27,7				98		60	108,7
1970	25				38,3		21,5	41,2
1971	30,2				39,8		37	40,7
1972	46,2	33,0			114		75	103,8
1973	47,7	24,0			73		80	93,6

Validación de datos y análisis de sensibilidad en el estudio de avenidas de cuencas mediterráneas

Años	Cartagena Pozo Estrecho	Torre Pacheco C.C.A.	Los Alcázares Aeródromo	Torre Pacheco Torreblanca	Cartagena H.E.	Cartagena Esc. Bastarreche	Cartagena el Algar	Cartagena Puerto
1974	60	0,0			50		66	50,7
1975	49	52,0		39	54,5		47	42,6
1976	14	24,0		43	37,8		31,5	38,5
1977	47	40,0		98	38,2		69	38,8
1978	84	28,0		16	21,8		23	36
1979	26	22,0		31,7	37		80	31,5
1980	34	40,0		72,7	50		98	44,4
1981	51	56,0		57	21,2		81	17,5
1982	46	82,0		34,5	70		67	59
1983	64	49,5		18,5	45		65	41,7
1984	56	17,0		13,5	20		17,8	38,3
1985	138	81,5		66,5	105,5		160,5	105,5
1986	66	45,5		53	35,7		67	32,4
1987	17	55,5		140,5	28,5		80	28,6
1988	45	45,7		69	54		46	43,5
1989	68	72,0		75,5	68,5		100	59,5
1990	58	37,0		39	44		65,5	55,5
1991	50	72,5		76,4	63		58,5	67,5
1992	160	70,0		80,5	66		54,5	65
1993	33	118,5		140	145		137	130
1994	44	83,2		41	70		67	43,7
1995	68	12,8		14	26,5		25	29,7
1996	72	45,0		47	62		37,5	48,9
1997	45,6	74,0		49,3	37,5		40	58,9
1998	41	67,3		27	35		42	46
1999	48	44,5		17,6	44,5		41	31,5
2000	42,5	153,4		70	48,5		66	145,6
2001		37,5		42	0		85	30,1
2002		29,0		26			55	40,8
2003		86,9		87			122	72,9
2004		62,4		81			83	39,1
2005				40			27	
2006				26,7			35,5	
2007				43			16	
2008				45,9			45	
2009				57,5			79	

Tabla 6.13. Precipitaciones máximas diarias para las estaciones del grupo 3

6.8.1.2. Ajuste según la distribución de Gumbel a las estaciones pluviométricas

En segundo lugar, a los datos de precipitaciones máximas diarias se les ha aplicado el criterio estadístico de Gumbel con el fin de obtener la precipitación total diaria correspondiente a cada periodo de retorno mediante una función de distribución.

Los valores obtenidos con este ajuste para cada una de las subcuencas se muestran a continuación:

Estaciones	Precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Murcia (El Valle)	69,82	85,67	120,55	135,29	149,98	169,36	184,00
Murcia El Sequen	65,91	85,20	127,66	145,60	163,49	187,08	204,90
Murcia (Corvera)	73,74	91,08	129,23	145,37	161,44	182,64	198,70
Murcia (Los Martínez del Puerto)	79,30	98,73	141,49	159,57	177,58	201,34	219,30
Alhama (Comarza)	82,72	103,37	148,84	168,05	187,20	212,47	231,60
Mazarrón	111,11	140,66	205,69	233,19	260,58	296,72	324,00
Fuente Álamo S.E. Agraria	70,52	86,96	123,14	138,43	153,67	173,78	189,00
Fuente Álamo C.H.	78,16	93,13	126,05	139,97	153,84	172,14	186,00
Fuente Álamo Balsapintada	84,49	109,51	164,58	187,86	211,05	241,66	264,80
Valladolises	79,62	100,64	146,91	166,47	185,96	211,67	231,10
Cartagena (Pozo Estrecho)	81,74	100,76	142,62	160,32	177,95	201,22	218,80
Torre-Pacheco C.C.A.	80,00	100,78	146,52	165,86	185,12	210,54	229,80
Torre-Pacheco (Torreblanca)	80,21	100,94	146,57	165,86	185,08	210,44	229,60
Los Alcázares Aeródromo	106,16	145,28	231,38	267,78	304,05	351,89	388,10
Cartagena H.E.	76,88	96,41	139,38	157,55	175,65	199,53	217,60
Cartagena Esc. Bastarreche	83,41	105,48	154,06	174,60	195,06	222,06	242,50
Cartagena (El Algar)	92,31	111,88	154,94	173,14	191,28	215,21	233,30
Cartagena Puerto	82,81	105,24	154,62	175,50	196,30	223,74	244,50

Tabla 6.14. Resultados del ajuste de Gumbel

6.8.1.3. Máximas lluvias diarias en la España Peninsular

A los datos de precipitaciones máximas diarias también se les ha aplicado el método de las Máximas Lluvias en la España Peninsular, con el fin de poder comparar los resultados de ambos ajustes, y elegir aquellos datos con un valor mayor de la precipitación. Si se eligiera el método cuyas precipitaciones tienen un valor menor, no se estaría del lado de la seguridad.

Estaciones	Precipitaciones máximas diarias para cada periodo de retorno					
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500
Murcia (El Valle)	70,63	88,56	132,84	154,44	177,12	208,44
Murcia El Sequen	70,63	88,56	132,84	154,44	177,12	208,44
Murcia (Corvera)	70,63	88,56	132,84	154,44	177,12	208,44
Murcia (Los Martínez del Puerto)	69,32	86,92	130,38	151,58	173,84	204,58
Alhama (Comarza)	69,32	86,92	130,38	151,58	173,84	204,58
Mazarrón	68,02	85,28	127,92	148,72	170,56	200,72
Fuente Álamo S.E. Agraria	71,94	90,20	135,30	157,30	180,40	212,30
Fuente Álamo C.H.	71,94	90,20	135,30	157,30	180,40	212,30
Fuente Álamo Balsapintada	70,63	88,56	132,84	154,44	177,12	208,44
Valladolides	70,63	88,56	132,84	154,44	177,12	208,44
Cartagena (Pozo Estrecho)	71,94	90,20	135,30	157,30	180,40	212,30
Torre-Pacheco C.C.A.	71,94	90,20	135,30	157,30	180,40	212,30
Torre-Pacheco (Torreblanca)	73,25	91,84	137,76	160,16	183,68	216,16
Los Alcázares Aeródromo	77,17	96,76	145,14	168,74	193,52	227,74
Cartagena H.E.	74,56	93,48	140,22	163,02	186,96	220,02
Cartagena Esc. Bastarache	73,25	91,84	137,76	160,16	183,68	216,16
Cartagena (El Algar)	81,10	101,68	152,52	177,32	203,36	239,32
Cartagena Puerto	68,32	80,64	111,44	126,00	141,12	161,84

Tabla 6.15. Precipitaciones máximas diarias obtenidas mediante el método de Las Máximas Lluvias en la España Peninsular

6.8.1.4. Comparación de datos obtenidos

Para poder ver claramente qué método elegir, se hará una comparativa con los datos de ambos métodos mediante una gráfica:

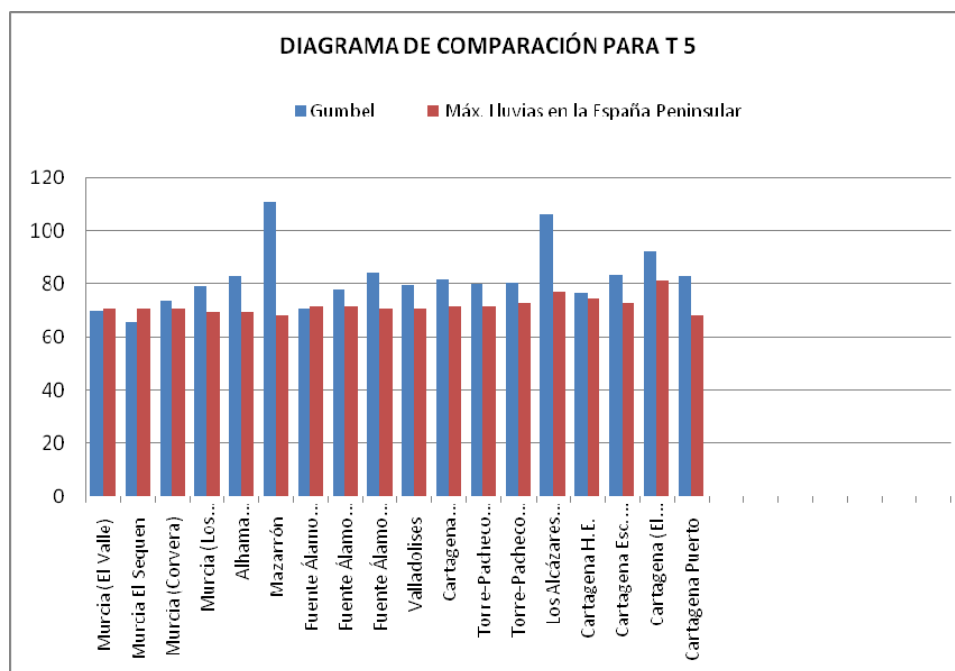


Fig.6.15. Diagrama de comparación para el periodo de retorno de 5 años para todas las estaciones

Como se puede observar en el gráfico anterior, los valores de precipitaciones obtenidos mediante el método de Gumbel tienen un valor superior a los obtenidos por el método de las Máximas Lluvias en la España Peninsular, por lo que, las precipitaciones de Gumbel serán las usadas para los cálculos de Thiessen.

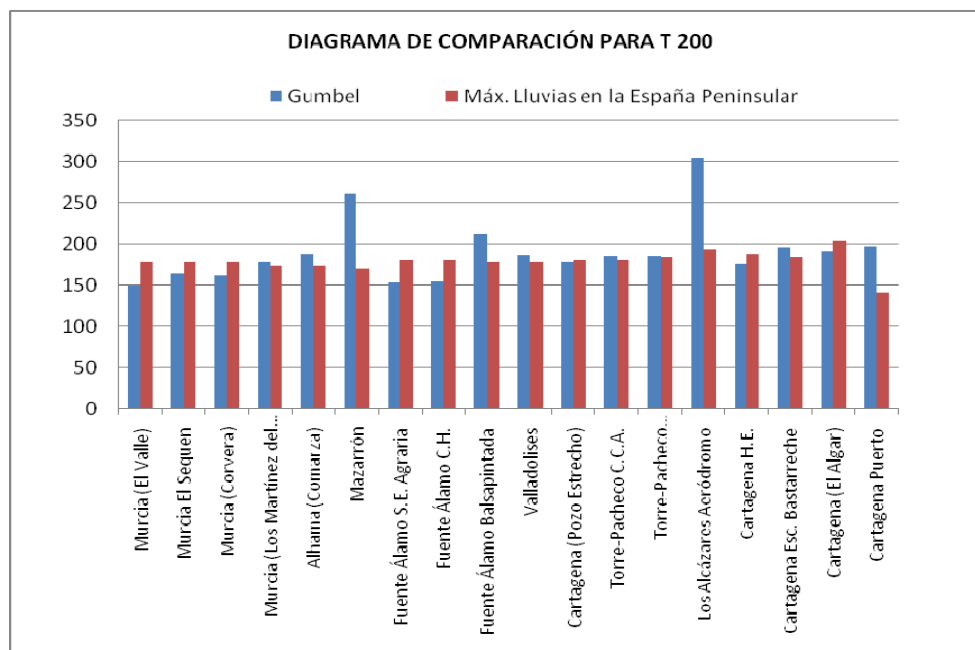


Fig.6.16. Diagrama de comparación para el periodo de retorno de 200 años para todas las estaciones

Sin embargo, para periodos de retorno superiores a 100 años, el método de regionalización de máximas lluvias es ligeramente superior al de Gumbel en algunas estaciones. En todo caso, a partir de ahora se trabajarán con precipitaciones obtenidas con el método de Gumbel.

El motivo de que las precipitaciones obtenidas con el método de Gumbel para las estaciones de Mazarrón y Los Alcázares Aeródromo sean tan distintas a las obtenidas mediante el método de las máximas lluvias en la España Peninsular es que la serie de precipitaciones máximas diarias original de ambas estaciones, facilitada por el AEMet, contiene datos de solo unos pocos años. Por tanto, estos datos pueden no ser 100% representativos.

Destacar que no ha sido posible la comparación de las precipitaciones para periodos de retorno superiores a 500 años ya que el método de las máximas lluvias en la España Peninsular no contempla los coeficientes de variación (C_v) para dichos periodos.

6.8.1.5. Cálculo de la precipitación media máxima diaria para cada subcuenca: Polígonos de Thiessen

Para conocer el valor de la precipitación en cada subcuenca se ha empleado el método de Thiessen. En ArcMap se han calculado los polígonos de Thiessen para cada subcuenca. Para ello se ha multiplicado el área de cada subcuenca que corresponde a cada estación por la precipitación de dicha estación.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Rambla de Fuente Álamo	79,11	98,45	141,00	158,99	176,91	200,55	211,27
Rambla del Albuñón	80,13	101,20	147,57	167,17	186,70	212,47	232,05
Albuñón tramo final	80,10	101,49	148,58	168,49	188,32	214,49	234,87

Tabla 6.16. Precipitación media máxima diaria de Thiessen para las subcuencas mayores de 100 km²

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
La Pinilla	79,45	98,78	141,32	159,30	177,22	200,86	218,73
Loma del Mojón	79,79	99,37	142,48	160,70	178,86	202,82	220,94
Los Gálvez	76,05	94,88	136,33	153,86	171,32	194,35	211,77
Cuevas de Ryllo	75,33	93,33	132,93	149,67	166,35	188,36	205,00
El Ventorrillo	75,86	94,29	134,86	152,01	169,10	191,64	144,73
La Capellanía	91,97	118,26	176,13	200,59	224,96	257,12	281,42
Rambla de la Azohía	74,66	90,30	124,73	139,28	153,78	172,91	187,40
Rambla de Fuente Álamo	77,46	96,24	137,57	155,04	172,45	195,42	212,78
Rincón de Lobera	78,17	93,21	126,31	140,30	154,24	172,64	186,56
Rambla de la Murta	75,13	92,96	132,20	148,78	165,31	187,11	203,61

Subcuencas	Precipitación media máxima diaria con el método de Thiessen						
	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Rambla del Fraile	81,47	103,72	152,68	173,38	194,00	221,21	241,77
Valladolises	76,76	96,18	138,91	156,98	174,98	198,72	216,69
Albujón	82,22	104,93	154,89	176,01	197,06	224,83	245,82
Los Martínez del Puerto	77,31	96,09	137,41	154,88	172,29	195,25	212,45
Pozo Estrecho	80,70	101,07	145,89	164,84	183,72	208,62	226,76
Las Moreras	74,10	93,37	135,77	153,69	171,55	195,11	211,23
Roldán	79,77	100,08	144,78	163,67	182,50	207,34	226,13
Albujón tramo final	89,17	116,20	175,67	200,82	225,87	258,92	283,93

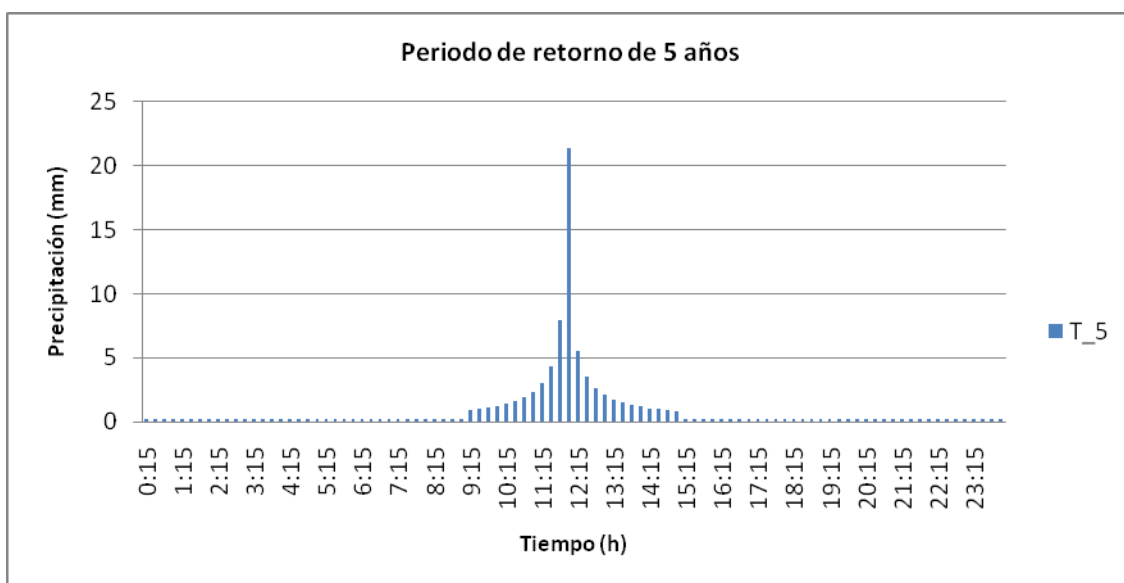
Tabla 6.17. Precipitación media máxima diaria de Thiessen para las subcuencas menores de 50 km²

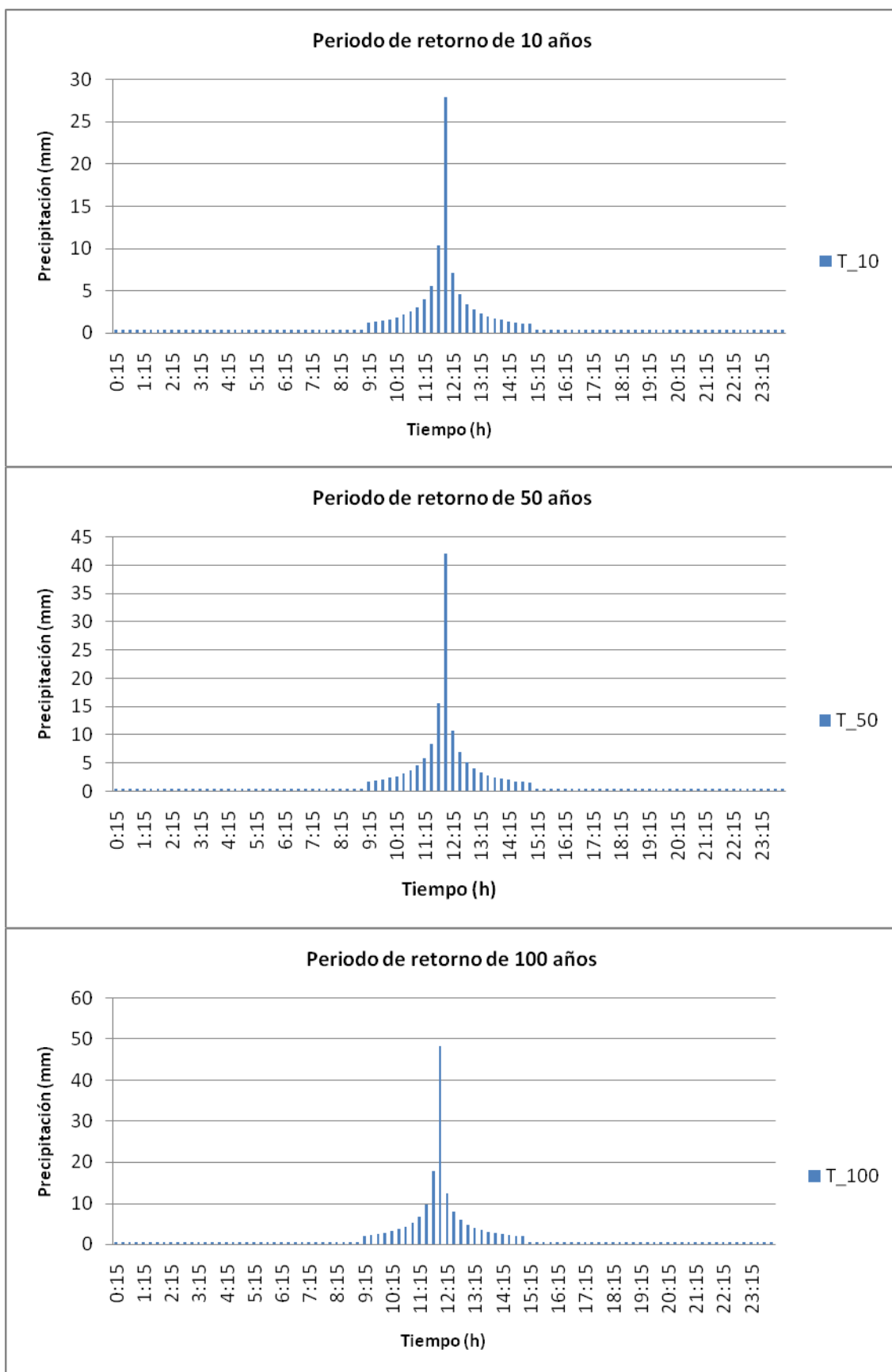
6.8.2. Patrón de precipitación

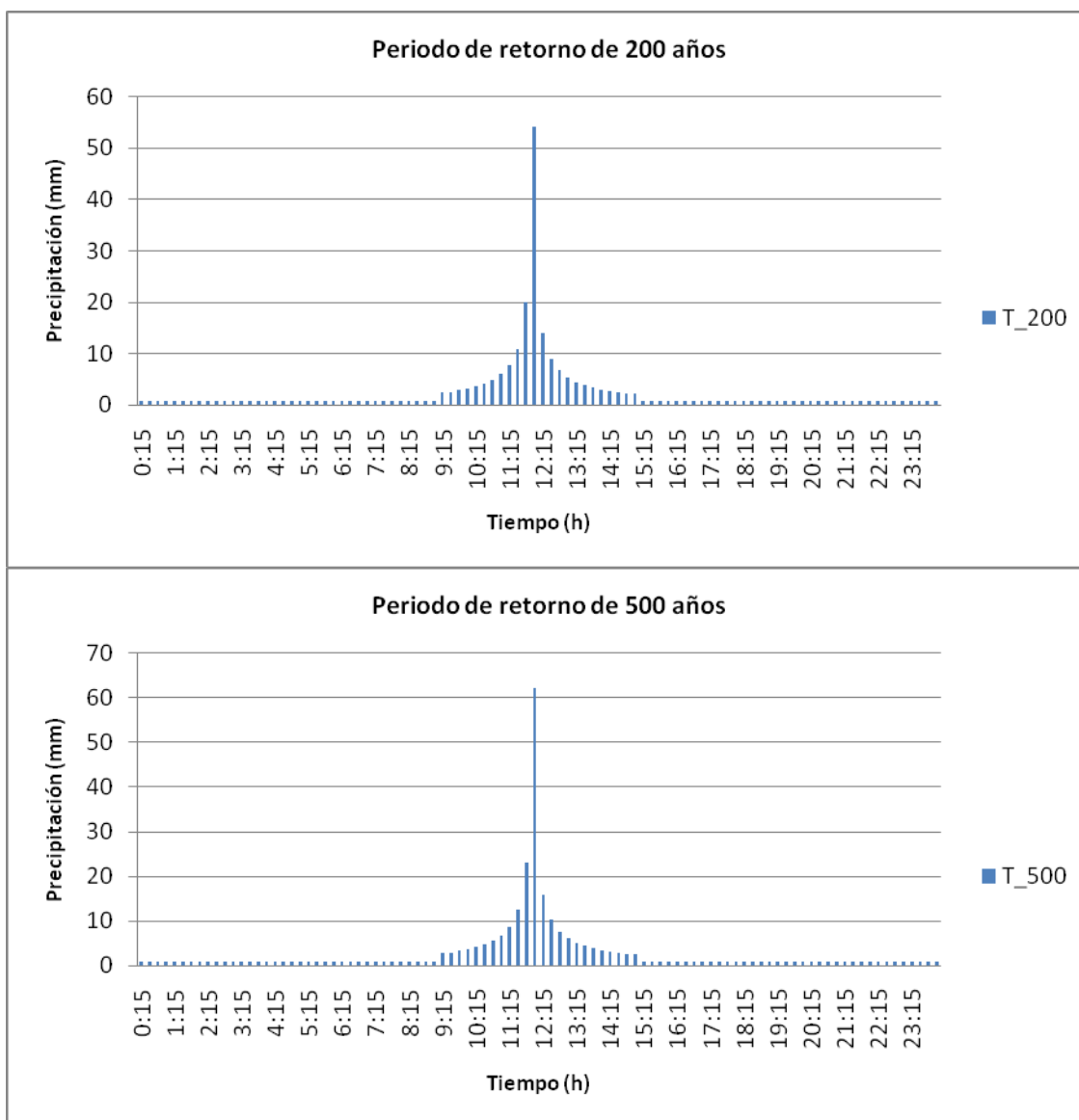
Para el establecimiento de la precipitación se ha determinado un hietograma definido por el usuario, basado en el análisis estadístico llevado a cabo sobre registros históricos en pluviómetros representativos. Se ha partido de valores de precipitación máxima diaria para cada periodo de retorno y se les ha aplicado una distribución conforme al patrón de distribución de LINDE modificado.

A continuación se muestran los hietogramas correspondientes a la subcuenca de salida (Albujón tramo final) para cada periodo de retorno y en el caso de los diferentes tamaños de las subcuencas.

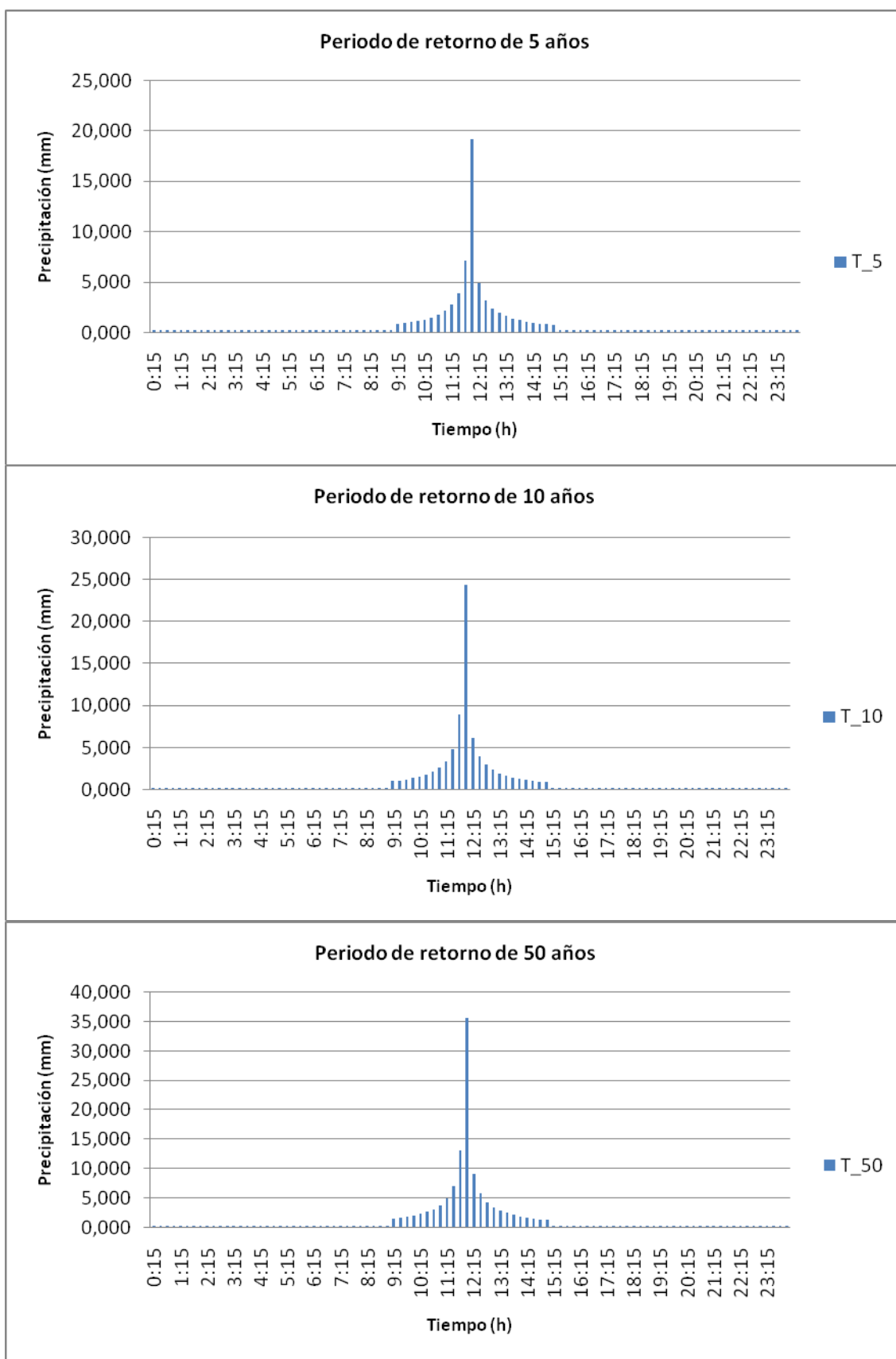
- Subcuencas mayores a 100 km²

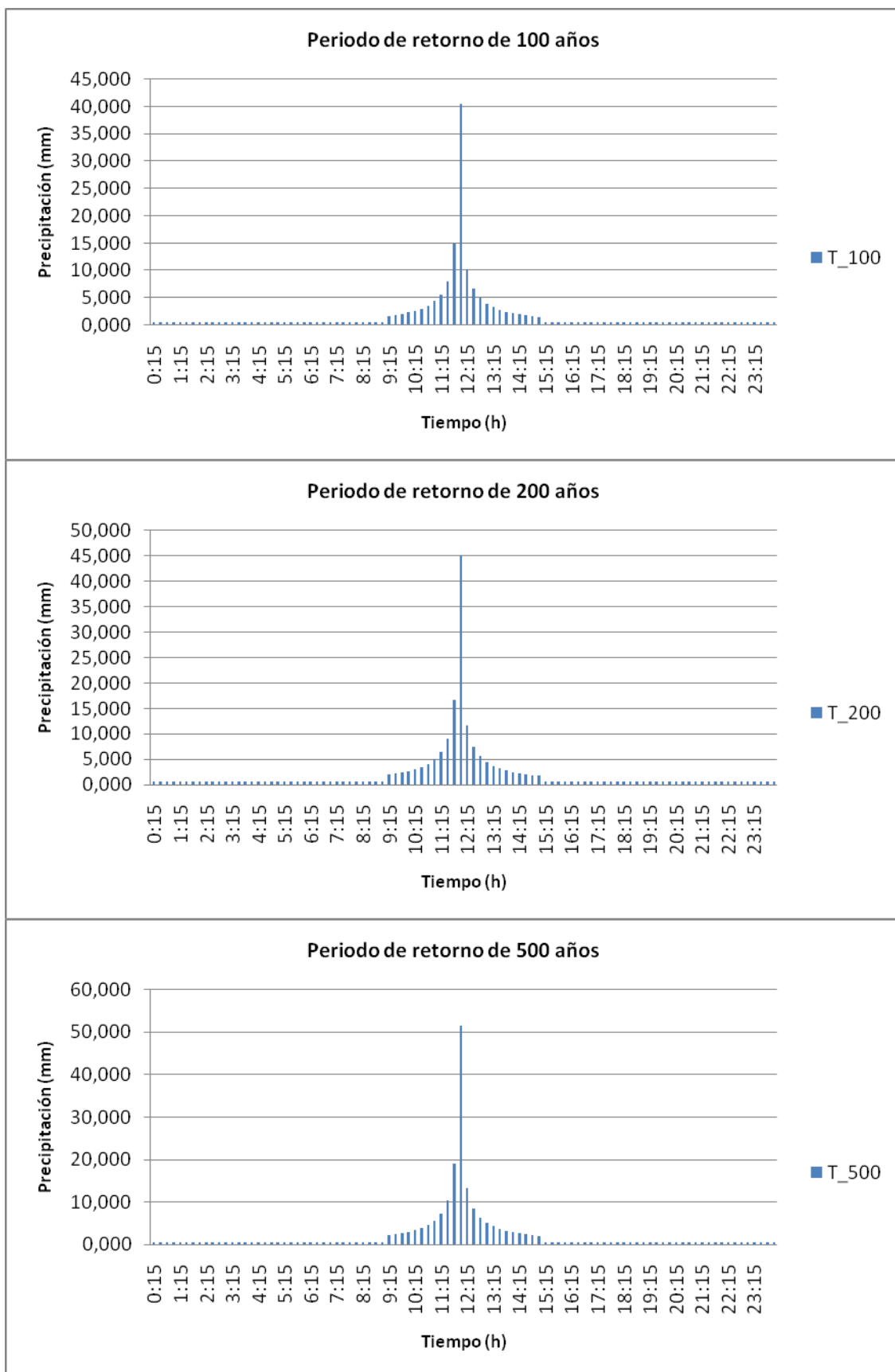






- Subcuencas menores de 50 km²





6.9. Resultados

A continuación se muestra una tabla resumen en la que aparecen los caudales pico del hidrograma, usando el método del SCS y el de la Onda Cinemática, a la salida de la cuenca completa para cada periodo de retorno.

Cuenca completa (SCS)	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Subcuencas > de 100 km ²	907,10	1414,00	2663,40	3224,00	3788,90	4513,59	5019,20
Subcuencas < de 50 km ²	985,00	1553,50	2947,50	3340,90	4193,90	5051,90	5584,50

Tabla 6.18. Resumen de caudales punta en m³/s para el método del SCS

Cuenca completa (KW)	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Subcuencas > de 100 km ²	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,9
Subcuencas < de 50 km ²	853,2	1544,6	3663,0	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3

Tabla 6.19. Resumen de caudales punta en m³/s para el método de la Onda Cinemática

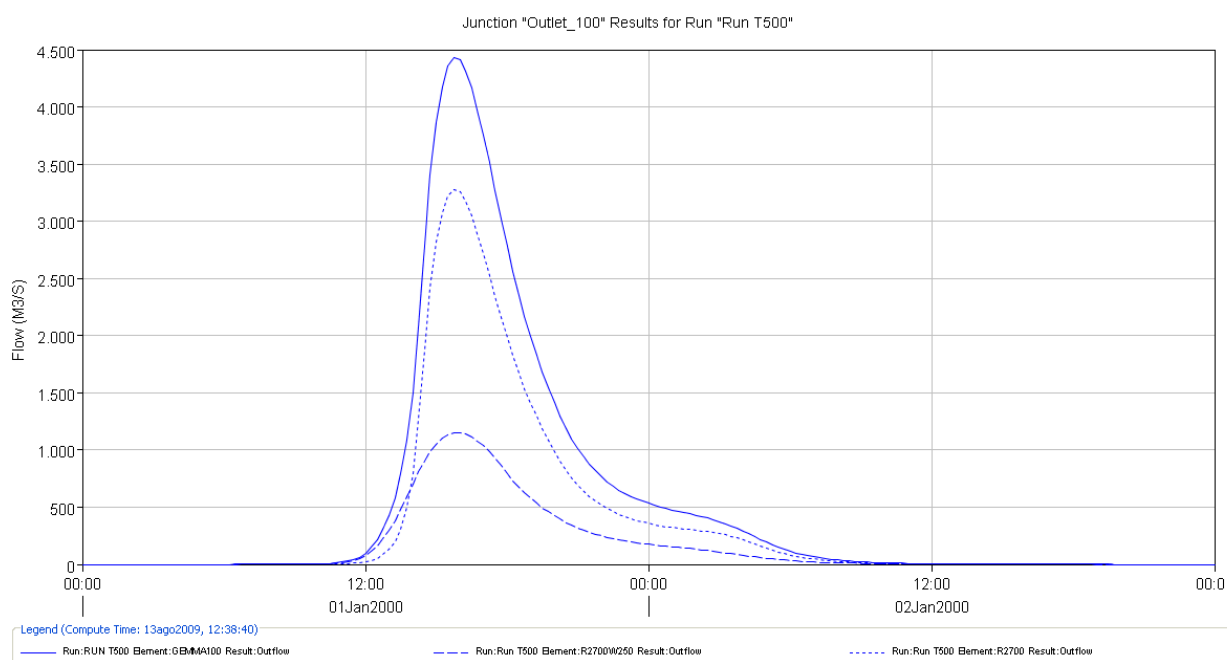


Fig.6.18. Hidrograma de salida de la cuenca completa aplicando el método del SCS, formada por subcuencas mayores de 100 km² para 500 años de periodo de retorno

6.10. Aplicación a la cuenca de estudio de la Instrucción 5.2-IC

Para comprobar los caudales obtenidos con HEC-HMS se propone comparar los resultados con el método de cálculo de la Instrucción 5.2.-IC.

El método de cálculo de caudales de la Instrucción de Drenaje 5.2-IC, desarrollada por el antiguo MOPU, es un método hidrometeorológico que supone una ligera modificación del Método Racional. Con esta modificación se busca corregir los resultados poco satisfactorios que se obtienen con el Método Racional, que en general sobreestiman la ley de frecuencia de caudales, especialmente en el rango de bajos y medios períodos de retorno, manteniendo a su vez la sencillez del método, compuesto por un número muy reducido de parámetros que tienen un claro sentido físico que favorece el control de los cálculos.

6.10.1. Fundamento teórico

Para cuencas pequeñas el método hidrometeorológico de la Instrucción es muy apropiado, ya que se basa en la aplicación de una intensidad media de precipitación sobre la superficie de la cuenca. Sin embargo, conforme aumenta el tamaño de la cuenca esta hipótesis va perdiendo sentido, disminuyendo por tanto la precisión en los cálculos.

- Fórmula de cálculo

La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$Q = K \cdot (C \cdot I \cdot A) / 3,6 \quad (7.1)$$

siendo:

Q (m³/s): Caudal punta.

I (mm/h): Máxima intensidad media en el intervalo de duración t_c , siendo t_c el tiempo de concentración de la cuenca estimado mediante la fórmula de Témez.

A (km²): Área de cuenca.

C: Coeficiente de escorrentía.

K: Coeficiente de uniformidad.

- Precipitación de cálculo

El método considera un factor de simultaneidad que permite obtener valores de precipitación areal sobre la cuenca a partir de valores puntuales previamente estimados.

El factor de simultaneidad puede estimarse usando la siguiente fórmula:

$$K_A = 1 - (\log A/15) \quad (7.2)$$

donde A es el área de la cuenca en km².

Luego se obtiene el valor de la precipitación de cálculo "P" como:

$$P = K_A \cdot P_d \quad (7.3)$$

siendo P_d el valor de la precipitación máxima diaria correspondiente al período de retorno de análisis.

- Máxima intensidad media de precipitación

La aplicación del método es compatible con el empleo de cualquier curva de Intensidad - Duración, aunque normalmente se utiliza la fórmula siguiente, donde en el caso concreto de España, la Dirección General de Carreteras facilita un mapa (ver figura 7.1.) con la variación espacial del parámetro I₁/I_d.

$$I_t = \frac{P}{24} \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{289t^2 - 1}{289t^2 - 1}} \quad (7.4)$$

siendo:

I_d: Intensidad media diaria de precipitación (mm/h), igual a 24 P_d, correspondiente al período de retorno considerado.

I₁: Intensidad horaria de precipitación (mm/h) correspondiente a dicho período de retorno. El valor de I₁/I_d se obtiene de la Figura 46.

t: Duración del intervalo al que se refiere I_t, que se considerará igual al tiempo de concentración de la cuenca.



Fig. 6.19. Mapa de isolinías I_1/I_0 .

- Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\left[\left(\frac{P}{P_0}\right) - 1\right] \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0}\right) + 23\right]}{\left[\left(\frac{P}{P_0}\right) + 11\right]^2} \quad (7.5)$$

siendo:

P: Precipitación de cálculo.

P_0 : Umbral de escorrentía.

P_0 es función de las condiciones de humedad del suelo, de su capacidad de infiltración, de su uso y de la pendiente del terreno. Su valor se determina mediante las tablas que propone el método, aunque también puede determinarse en función del número de curva:

$$P_0 = (5000/CN) - 50 \quad (7.6)$$

Al valor de P_0 se le puede aplicar un factor corrector que considere la variación regional de la humedad del suelo al comienzo de aguaceros significativos. Este factor intenta evitar sobrevaloraciones del caudal. En la Figura 6.20. se muestran los valores de este factor de corrección para el territorio nacional.



Fig. 6.20 .Coeficiente corrector del umbral de escorrentía P_0 .

Hay que advertir que aunque la figura 6.20. indique un factor de corrección de P_0 de valor 3 para la zona de estudio, varios estudios y trabajos demuestran que los resultados en las subcuencas se ajustan mejor utilizando un coeficiente de 1,5 ya que un valor de 3 estaría subestimando los caudales de salida.

- Coeficiente de uniformidad

Como se comentó anteriormente, al ir aumentando el tamaño de la cuenca algunas de las hipótesis implícitas en la formulación del método dejan de cumplirse y por lo tanto los resultados obtenidos deben ser corregidos. Uno de los efectos más importantes a corregir es el relativo al supuesto reparto uniforme de la escorrentía dentro del intervalo de cálculo de

duración t_c . El coeficiente de uniformidad K varía de un aguacero a otro, pero su valor medio en una cuenca concreta depende principalmente del valor de su tiempo de concentración. Puede estimarse usando la siguiente fórmula:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.28}}{t_c^{1.28} + 14} \quad (7.7)$$

6.10.2. Aplicación a la cuenca de estudio

A continuación se muestran los resultados para cada subcuenca y para la cuenca completa, además de un cuadro resumen con los caudales punta.

Periodo de retorno de 5 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T5 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	P _{oc} (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	201,7	80,14	0,85	67,89	11,09	77,00	9,67	14,94	1,50	22,40	0,32	1,59	269,86
R. del Albujón	167,9	80,10	0,85	68,44	12,62	76,00	9,36	15,79	1,50	23,68	0,30	1,63	197,22
R. de Fuente Álamo	321,18	79,12	0,83	65,90	9,87	73,00	9,73	18,49	1,50	27,74	0,25	1,56	336,95
Q_TOTAL													804,03

Periodo de retorno de 10 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T10 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	P _{oc} (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	201,7	101,20	0,85	85,74	11,09	77,00	12,21	14,94	1,50	22,40	0,40	1,59	425,03
R. del Albujón	167,9	101,50	0,85	86,71	12,62	76,00	11,86	15,79	1,50	23,68	0,38	1,63	315,57
R. de Fuente Álamo	321,18	98,45	0,83	82,00	9,87	73,00	12,11	18,49	1,50	27,74	0,32	1,56	537,20
Q_TOTAL													1277,79599

Periodo de retorno de 50 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T50 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	P _{oc} (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	201,7	147,57	0,85	125,02	11,09	77,00	17,81	14,94	1,50	22,40	0,53	1,59	824,00
R. del Albujón	167,9	148,59	0,85	126,94	12,62	76,00	17,37	15,79	1,50	23,68	0,52	1,63	622,95
R. de Fuente Álamo	321,18	141,00	0,83	117,44	9,87	73,00	17,34	18,49	1,50	27,74	0,44	1,56	1066,73
Q_TOTAL													2513,69

Periodo de retorno de 100 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T100 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	P _{oc} (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	201,7	167,18	0,85	141,63	11,09	77,00	20,17	14,94	1,50	22,40	0,58	1,59	1008,70
R. del Albujón	167,9	168,49	0,85	143,95	12,62	76,00	19,69	15,79	1,50	23,68	0,56	1,63	766,14
R. de Fuente Álamo	321,18	158,99	0,83	132,42	9,87	73,00	19,55	18,49	1,50	27,74	0,49	1,56	1317,64
Q_TOTAL													3092,48

Periodo de retorno de 200 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T200 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	P _{oc} (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	201,7	186,71	0,85	158,18	11,09	77,00	22,53	14,94	1,50	22,40	0,61	1,59	1199,19
R. del Albujón	167,9	188,32	0,85	160,89	12,62	76,00	22,01	15,79	1,50	23,68	0,60	1,63	914,20
R. de Fuente Álamo	321,18	176,91	0,83	147,35	9,87	73,00	21,75	18,49	1,50	27,74	0,52	1,56	1579,52
Q_TOTAL													3692,90

Periodo de retorno de 500 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T500 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	P _{oc} (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	201,7	212,47	0,85	180,01	11,09	77,00	25,64	14,94	1,50	22,40	0,66	1,59	1458,02
R. del Albujón	167,9	214,49	0,85	183,24	12,62	76,00	25,07	15,79	1,50	23,68	0,64	1,63	1115,88
R. de Fuente Álamo	321,18	200,56	0,83	167,04	9,87	73,00	24,66	18,49	1,50	27,74	0,57	1,56	1939,69
Q_TOTAL													4513,59

Periodo de retorno de 1000 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T1000 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Albujón tramo final	195,90	232,05	0,85	196,59	11,09	77,00	28,00	14,94	1,50	22,40	0,68	1,59	1659,04
R. del Albujón	153,18	234,87	0,85	200,65	12,62	76,00	27,45	15,79	1,50	23,68	0,67	1,63	1276,80
R. de Fuente Álamo	321,18	211,27	0,83	175,96	9,87	73,00	25,98	18,49	1,50	27,74	0,58	1,56	2107,42
												Q_TOTAL	5043,26

Tabla 6.20. Resultados para las subcuencas mayores de 100 km²

Periodo de retorno de 5 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T5 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	77,31	0,89	68,94	7,39	78	11,11	14,10	1,50	21,15	0,33	1,47	62,85
Las Moreras	52,10	74,10	0,89	65,62	9,12	79	9,93	13,29	1,50	19,94	0,34	1,53	73,71
R. de la Murta	31,60	75,13	0,90	67,62	6,26	74	11,44	17,57	1,50	26,35	0,25	1,41	35,44
Valladolises	43,37	76,76	0,89	68,38	8,46	77	10,58	14,94	1,50	22,40	0,31	1,51	59,22
Los Gálvez	30,69	76,05	0,90	68,51	5,72	77	11,91	14,94	1,50	22,40	0,31	1,39	42,95
Albujón	41,29	82,22	0,89	73,36	8,54	78	11,32	14,10	1,50	21,15	0,35	1,51	68,70
Pozo Estrecho	40,71	80,70	0,89	72,04	8,87	77	10,99	14,94	1,50	22,40	0,32	1,52	61,43
Roldán	52,22	79,77	0,89	70,64	8,71	77	10,84	14,94	1,50	22,40	0,32	1,52	76,48
Loma del Mojón	34,22	79,79	0,90	71,63	3,86	73	13,93	18,49	1,50	27,74	0,25	1,28	42,68
El Ventorrillo	36,06	75,86	0,90	67,98	6,65	75	11,31	16,67	1,50	25,00	0,27	1,43	43,63
R. del Fraile	27,81	81,47	0,90	73,63	6,34	77	12,42	14,94	1,50	22,40	0,33	1,42	44,60
R. de Fuente Álamo	15,61	77,46	0,92	71,30	4,75	81	13,08	11,73	1,50	17,59	0,39	1,33	29,72
Albujón tramo final	49,40	89,17	0,89	79,10	9,03	76	12,00	15,79	1,50	23,68	0,34	1,53	85,43
Cuevas de Ryllo	37,94	75,33	0,89	67,40	6,80	80	11,13	12,50	1,50	18,75	0,36	1,44	61,07
Rincón de Lobera	16,00	78,17	0,92	71,90	4,03	73	13,81	18,49	1,50	27,74	0,25	1,29	19,46
La Pinilla	27,28	79,45	0,90	71,85	4,56	76	13,33	15,79	1,50	23,68	0,30	1,32	40,23
R. de la Azohía	39,78	74,66	0,89	66,70	4,84	76	12,17	15,79	1,50	23,68	0,28	1,34	50,58
La Capellanía	52,00	91,97	0,89	81,45	4,83	78	14,86	14,10	1,50	21,15	0,39	1,34	111,67
												Q_TOTAL	1009,84

Periodo de retorno de 10 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T10 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	96,09	0,89	85,68	7,39	78	13,81	14,10	1,50	21,15	0,40	1,47	95,75
Las Moreras	52,10	93,37	0,89	82,68	9,12	79	12,51	13,29	1,50	19,94	0,41	1,53	114,88
R. de la Murta	31,60	92,96	0,90	83,67	6,26	74	14,16	17,57	1,50	26,35	0,32	1,41	55,86
Valladolises	43,37	96,18	0,89	85,68	8,46	77	13,26	14,94	1,50	22,40	0,38	1,51	92,55
Los Gálvez	30,69	94,88	0,90	85,48	5,72	77	14,85	14,94	1,50	22,40	0,38	1,39	66,69
Albujón	41,29	104,93	0,89	93,62	8,54	78	14,45	14,10	1,50	21,15	0,43	1,51	108,80
Pozo Estrecho	40,71	101,07	0,89	90,22	8,87	77	13,76	14,94	1,50	22,40	0,40	1,52	95,13
Roldán	52,22	100,08	0,89	88,62	8,71	77	13,60	14,94	1,50	22,40	0,40	1,52	119,06
Loma del Mojón	34,22	99,37	0,90	89,21	3,86	73	17,35	18,49	1,50	27,74	0,32	1,28	68,06
El Ventorrillo	36,06	94,29	0,90	84,50	6,65	75	14,05	16,67	1,50	25,00	0,34	1,43	68,58
R. del Fraile	27,81	103,72	0,90	93,73	6,34	77	15,81	14,94	1,50	22,40	0,41	1,42	71,10
R. de Fuente Álamo	15,61	96,24	0,92	88,58	4,75	81	16,25	11,73	1,50	17,59	0,47	1,33	44,07
Albujón tramo final	49,40	116,20	0,89	103,08	9,03	76	15,64	15,79	1,50	23,68	0,43	1,53	141,27
Cuevas de Ryllo	37,94	93,33	0,89	83,50	6,80	80	13,79	12,50	1,50	18,75	0,44	1,44	91,23
Rincón de Lobera	16,00	93,21	0,92	85,73	4,03	73	16,47	18,49	1,50	27,74	0,30	1,29	28,48
La Pinilla	27,28	98,78	0,90	89,33	4,56	76	16,57	15,79	1,50	23,68	0,37	1,32	62,16
R. de la Azohía	39,78	90,30	0,89	80,67	4,84	76	14,72	15,79	1,50	23,68	0,34	1,34	74,83
La Capellanía	52,00	118,26	0,89	104,73	4,83	78	19,11	14,10	1,50	21,15	0,48	1,34	176,17
Q_TOTAL													1574,68

Periodo de retorno de 50 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T50 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	137,41	0,89	122,52	7,39	78	19,75	14,10	1,50	21,15	0,53	1,47	179,54
Las Moreras	52,10	135,77	0,89	120,23	9,12	79	18,19	13,29	1,50	19,94	0,55	1,53	220,02
R. de la Murta	31,60	132,20	0,90	118,98	6,26	74	20,14	17,57	1,50	26,35	0,44	1,41	109,68
Valladolises	43,37	138,91	0,89	123,75	8,46	77	19,15	14,94	1,50	22,40	0,51	1,51	178,53
Los Gálvez	30,69	136,33	0,90	122,82	5,72	77	21,34	14,94	1,50	22,40	0,51	1,39	127,91
Albujón	41,29	154,89	0,89	138,21	8,54	78	21,33	14,10	1,50	21,15	0,57	1,51	211,00
Pozo Estrecho	40,71	145,89	0,89	130,23	8,87	77	19,87	14,94	1,50	22,40	0,53	1,52	181,42
Roldán	52,22	144,78	0,89	128,20	8,71	77	19,67	14,94	1,50	22,40	0,53	1,52	228,34
Loma del Mojón	34,22	142,48	0,90	127,91	3,86	73	24,87	18,49	1,50	27,74	0,45	1,28	135,12
El Ventorrillo	36,06	134,86	0,90	120,86	6,65	75	20,10	16,67	1,50	25,00	0,46	1,43	133,91
R. del Fraile	27,81	152,68	0,90	137,98	6,34	77	23,27	14,94	1,50	22,40	0,55	1,42	139,27
R. de Fuente Álamo	15,61	137,57	0,92	126,62	4,75	81	23,22	11,73	1,50	17,59	0,59	1,33	79,69
Albujón tramo final	49,40	175,67	0,89	155,84	9,03	76	23,65	15,79	1,50	23,68	0,58	1,53	285,29
Cuevas de Ryllo	37,94	132,93	0,89	118,93	6,80	80	19,65	12,50	1,50	18,75	0,56	1,44	166,92
Rincón de Lobera	16,00	126,31	0,92	116,17	4,03	73	22,32	18,49	1,50	27,74	0,40	1,29	51,77
La Pinilla	27,28	141,32	0,90	127,79	4,56	76	23,70	15,79	1,50	23,68	0,50	1,32	118,73
R. de la Azohía	39,78	124,73	0,89	111,43	4,84	76	20,33	15,79	1,50	23,68	0,46	1,34	137,05
La Capellanía	52,00	176,13	0,89	155,98	4,83	78	28,46	14,10	1,50	21,15	0,61	1,34	338,11
												Q_TOTAL	3022,28

Periodo de retorno de 100 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T100 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	154,88	0,89	138,10	7,39	78	22,26	14,10	1,50	21,15	0,57	1,47	218,21
Las Moreras	52,10	153,69	0,89	136,10	9,12	79	20,59	13,29	1,50	19,94	0,59	1,53	268,49
R. de la Murta	31,60	148,78	0,90	133,91	6,26	74	22,66	17,57	1,50	26,35	0,48	1,41	135,16
Valladolises	43,37	156,98	0,89	139,84	8,46	77	21,64	14,94	1,50	22,40	0,56	1,51	218,50
Los Gálvez	30,69	153,86	0,90	138,61	5,72	77	24,09	14,94	1,50	22,40	0,55	1,39	156,39
Albujón	41,29	176,01	0,89	157,05	8,54	78	24,24	14,10	1,50	21,15	0,61	1,51	257,91
Pozo Estrecho	40,71	164,84	0,89	147,15	8,87	77	22,45	14,94	1,50	22,40	0,57	1,52	221,32
Roldán	52,22	163,67	0,89	144,93	8,71	77	22,23	14,94	1,50	22,40	0,57	1,52	278,93
Loma del Mojón	34,22	160,70	0,90	144,27	3,86	73	28,06	18,49	1,50	27,74	0,49	1,28	166,86
El Ventorrillo	36,06	152,01	0,90	136,23	6,65	75	22,66	16,67	1,50	25,00	0,51	1,43	164,65
R. del Fraile	27,81	173,38	0,90	156,68	6,34	77	26,43	14,94	1,50	22,40	0,59	1,42	170,78
R. de Fuente Álamo	15,61	155,04	0,92	142,70	4,75	81	26,17	11,73	1,50	17,59	0,63	1,33	95,82
Albujón tramo final	49,40	200,82	0,89	178,14	9,03	76	27,03	15,79	1,50	23,68	0,62	1,53	351,63
Cuevas de Ryllo	37,94	149,67	0,89	133,91	6,80	80	22,12	12,50	1,50	18,75	0,60	1,44	201,51
Rincón de Lobera	16,00	140,30	0,92	129,04	4,03	73	24,79	18,49	1,50	27,74	0,44	1,29	62,74
La Pinilla	27,28	159,30	0,90	144,05	4,56	76	26,72	15,79	1,50	23,68	0,54	1,32	145,07
R. de la Azohía	39,78	139,28	0,89	124,43	4,84	76	22,70	15,79	1,50	23,68	0,49	1,34	166,10
La Capellanía	52,00	200,59	0,89	177,64	4,83	78	32,42	14,10	1,50	21,15	0,66	1,34	411,59
												Q_TOTAL	3691,66

Periodo de retorno de 200 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T200 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	172,29	0,89	153,62	7,39	78	24,76	14,10	1,50	21,15	0,61	1,47	258,07
Las Moreras	52,10	171,55	0,89	151,92	9,12	79	22,98	13,29	1,50	19,94	0,63	1,53	318,40
R. de la Murta	31,60	165,31	0,90	148,78	6,26	74	25,18	17,57	1,50	26,35	0,52	1,41	161,76
Valladolises	43,37	174,98	0,89	155,88	8,46	77	24,12	14,94	1,50	22,40	0,59	1,51	259,82
Los Gálvez	30,69	171,32	0,90	154,33	5,72	77	26,82	14,94	1,50	22,40	0,59	1,39	185,84
Albujón	41,29	197,06	0,89	175,83	8,54	78	27,14	14,10	1,50	21,15	0,65	1,51	306,08
Pozo Estrecho	40,71	183,72	0,89	164,00	8,87	77	25,02	14,94	1,50	22,40	0,61	1,52	262,47
Roldán	52,22	182,50	0,89	161,60	8,71	77	24,79	14,94	1,50	22,40	0,61	1,52	331,13
Loma del Mojón	34,22	178,86	0,90	160,57	3,86	73	31,23	18,49	1,50	27,74	0,53	1,28	199,98
El Ventorrillo	36,06	169,10	0,90	151,55	6,65	75	25,20	16,67	1,50	25,00	0,54	1,43	196,64
R. del Fraile	27,81	194,00	0,90	175,32	6,34	77	29,57	14,94	1,50	22,40	0,63	1,42	203,24
R. de Fuente Álamo	15,61	172,45	0,92	158,73	4,75	81	29,11	11,73	1,50	17,59	0,67	1,33	112,31
Albujón tramo final	49,40	225,87	0,89	200,36	9,03	76	30,40	15,79	1,50	23,68	0,66	1,53	419,77
Cuevas de Ryllo	37,94	166,35	0,89	148,84	6,80	80	24,59	12,50	1,50	18,75	0,64	1,44	237,02
Rincón de Lobera	16,00	154,24	0,92	141,86	4,03	73	27,25	18,49	1,50	27,74	0,47	1,29	74,19
La Pinilla	27,28	177,22	0,90	160,26	4,56	76	29,72	15,79	1,50	23,68	0,58	1,32	172,33
R. de la Azohía	39,78	153,78	0,89	137,38	4,84	76	25,06	15,79	1,50	23,68	0,53	1,34	196,28
La Capellanía	52,00	224,96	0,89	199,23	4,83	78	36,36	14,10	1,50	21,15	0,69	1,34	486,62
												Q_TOTAL	4381,95

Periodo de retorno de 500 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T500 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	195,25	0,89	174,10	7,39	78	28,06	14,10	1,50	21,15	0,65	1,47	312,23
Las Moreras	52,10	195,11	0,89	172,78	9,12	79	26,14	13,29	1,50	19,94	0,67	1,53	386,10
R. de la Murta	31,60	187,11	0,90	168,41	6,26	74	28,50	17,57	1,50	26,35	0,56	1,41	198,35
Valladolises	43,37	198,72	0,89	177,03	8,46	77	27,40	14,94	1,50	22,40	0,64	1,51	316,11
Los Gálvez	30,69	194,35	0,90	175,09	5,72	77	30,43	14,94	1,50	22,40	0,63	1,39	226,00
Albujón	41,29	224,83	0,89	200,61	8,54	78	30,96	14,10	1,50	21,15	0,69	1,51	371,23
Pozo Estrecho	40,71	208,62	0,89	186,23	8,87	77	28,41	14,94	1,50	22,40	0,65	1,52	318,39
Roldán	52,22	207,34	0,89	183,59	8,71	77	28,17	14,94	1,50	22,40	0,65	1,52	402,12
Loma del Mojón	34,22	202,82	0,90	182,07	3,86	73	35,41	18,49	1,50	27,74	0,57	1,28	245,51
El Ventorrillo	36,06	191,64	0,90	171,75	6,65	75	28,56	16,67	1,50	25,00	0,59	1,43	240,49
R. del Fraile	27,81	221,21	0,90	199,91	6,34	77	33,72	14,94	1,50	22,40	0,67	1,42	247,29
R. de Fuente Álamo	15,61	195,42	0,92	179,87	4,75	81	32,99	11,73	1,50	17,59	0,71	1,33	134,55
Albujón tramo final	49,40	258,92	0,89	229,68	9,03	76	34,85	15,79	1,50	23,68	0,70	1,53	511,93
Cuevas de Ryllo	37,94	188,36	0,89	168,53	6,80	80	27,84	12,50	1,50	18,75	0,67	1,44	285,07
Rincón de Lobera	16,00	172,64	0,92	158,78	4,03	73	30,50	18,49	1,50	27,74	0,51	1,29	89,97
La Pinilla	27,28	200,86	0,90	181,63	4,56	76	33,69	15,79	1,50	23,68	0,62	1,32	209,53
R. de la Azohía	39,78	172,91	0,89	154,47	4,84	76	28,18	15,79	1,50	23,68	0,57	1,34	237,63
La Capellanía	52,00	257,12	0,89	227,71	4,83	78	41,55	14,10	1,50	21,15	0,73	1,34	587,56
												Q_TOTAL	5320,08

Periodo de retorno de 1000 años													
Subcuencas	AREA (Km ²)	Pd_T1000 (mm)	Ka	P. cálculo	Tiempo de concentración (h)	CN	It (mm/h)	Po (mm)	Factor de Po	Poc (mm)	C	K	Q (m ³ /s)
Los Mrtz. Pto.	42,18	212,45	0,89	189,43	7,39	78	30,53	14,10	1,50	21,15	0,67	1,47	353,72
Las Moreras	52,10	211,23	0,89	187,05	9,12	79	28,29	13,29	1,50	19,94	0,69	1,53	433,34
R. de la Murta	31,60	203,61	0,90	183,25	6,26	74	31,02	17,57	1,50	26,35	0,59	1,41	226,96
Valladolises	43,37	216,69	0,89	193,04	8,46	77	29,87	14,94	1,50	22,40	0,66	1,51	359,75
Los Gálvez	30,69	211,77	0,90	190,78	5,72	77	33,16	14,94	1,50	22,40	0,66	1,39	257,13
Albujón	41,29	245,82	0,89	219,34	8,54	78	33,85	14,10	1,50	21,15	0,72	1,51	421,39
Pozo Estrecho	40,71	226,76	0,89	202,43	8,87	77	30,88	14,94	1,50	22,40	0,68	1,52	360,02
Roldán	52,22	226,13	0,89	200,23	8,71	77	30,72	14,94	1,50	22,40	0,68	1,52	457,06
Loma del Mojón	34,22	220,94	0,90	198,34	3,86	73	38,57	18,49	1,50	27,74	0,60	1,28	281,09
El Ventorrillo	36,06	144,73	0,90	129,71	6,65	75	21,57	16,67	1,50	25,00	0,49	1,43	151,42
R. del Fraile	27,81	241,77	0,90	218,49	6,34	77	36,85	14,94	1,50	22,40	0,70	1,42	281,28
R. de Fuente Álamo	15,61	212,78	0,92	195,85	4,75	81	35,92	11,73	1,50	17,59	0,73	1,33	151,62
Albujón tramo final	49,40	283,93	0,89	251,87	9,03	76	38,22	15,79	1,50	23,68	0,73	1,53	582,92
Cuevas de Ryllo	37,94	205,00	0,89	183,42	6,80	80	30,30	12,50	1,50	18,75	0,70	1,44	322,11
Rincón de Lobera	16,00	186,56	0,92	171,58	4,03	73	32,96	18,49	1,50	27,74	0,54	1,29	102,34
La Pinilla	27,28	218,73	0,90	197,79	4,56	76	36,69	15,79	1,50	23,68	0,65	1,32	238,38
R. de la Azohía	39,78	187,40	0,89	167,41	4,84	76	30,54	15,79	1,50	23,68	0,60	1,34	269,90
La Capellanía	52,00	281,42	0,89	249,23	4,83	78	45,48	14,10	1,50	21,15	0,76	1,34	664,88
												Q_TOTAL	5915,31

Tabla 6.21. Resultados para las subcuencas menores de 50 km²

6.10.2.1. Comparación del método racional con HEC-HMS

Respecto a la comparación de los caudales obtenidos mediante HEC-HMS con el método del SCS y el método de la Onda Cinemática para el patrón de LINDE modificado y mediante la instrucción 5.1 I.C., se observa que el caudal total de salida es del mismo orden de magnitud para todos los métodos.

Subcuencas mayores de 100 km ²							
Cuenca completa	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Método Racional	804,03	1277,80	2513,69	3092,48	3692,90	4513,59	5043,26
Método SCS	907,10	1414,00	2663,40	3224,00	3788,90	4513,59	5019,2
Método KW	422,7	805,3	1963,5	2607,0	3268,3	4287,1	4954,9

Subcuencas menores de 50 km ²							
Cuenca completa	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
Método Racional	1009,84	1574,68	3022,28	3691,66	4381,95	5320,08	5915,31
Método SCS	985,00	1553,50	2947,50	3340,90	4193,90	5051,90	5584,5
Método KW	853,2	1544,6	3663,0	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3

Tabla 6.22. Comparación de caudales en m³/s obtenidos con HEC-HMS (LINDE modificado) y la Instrucción con un coeficiente corrector de P₀ de 1,5

La mayor diferencia entre los resultados se observa en el método de la Onda Cinemática para el supuesto de que las subcuencas fueran mayores a 100 km², donde para periodos de retorno pequeños el caudal obtenido es casi la mitad que el calculado para el método racional. Sin embargo para periodos de retorno mayores los caudales se van igualando.

Para los caudales obtenidos con el SCS se observa unos resultados muy similares, sin grandes distanciamientos entre los datos

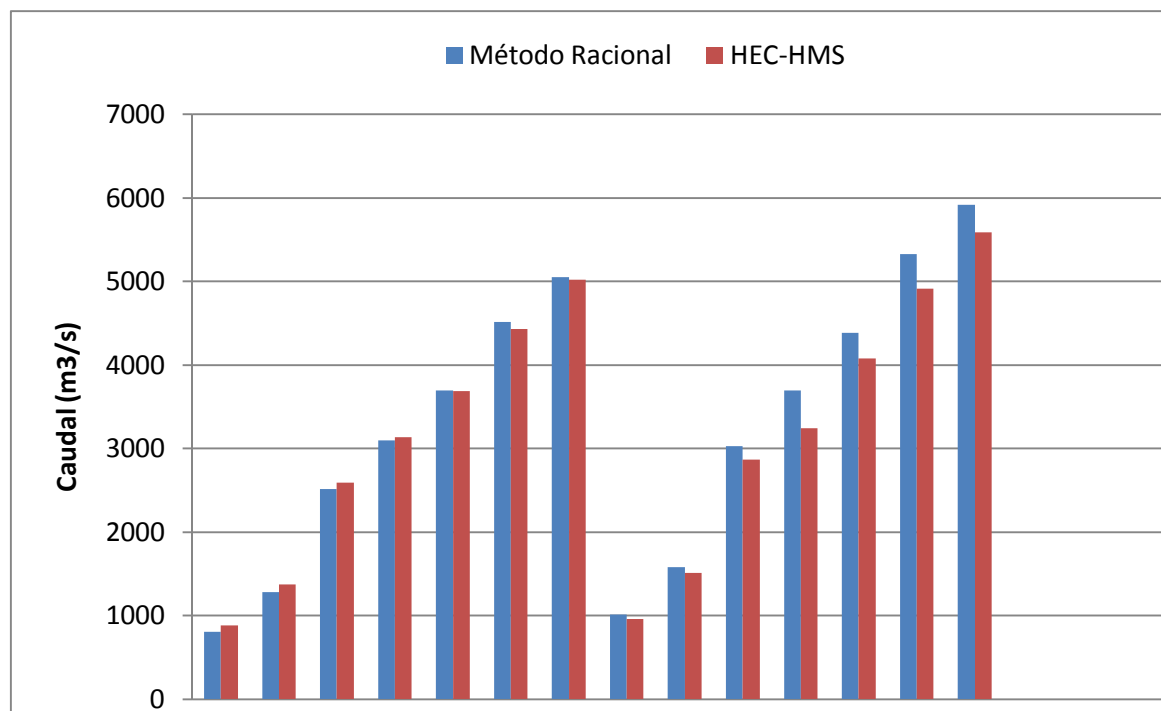


Fig. 6.21. Comparación de caudales entre el método racional y el método del SCS para ambos tamaños de subcuencas

7. Análisis de sensibilidad

En este estudio se propone realizar:

- Un análisis de sensibilidad del tamaño de las subcuencas que componen el modelo de cuenca (subcuencas de menos de 50 km² y cuencas mayores de 100 km²).
- Un análisis de sensibilidad sobre el método de transformación-lluvia escorrentía a emplear (método del Hidrograma unitario SCS o método de la Onda cinemática).

Para subcuencas con más de 100 km² y subcuencas con menos de 50 km² se han calculado las variables principales que intervienen en ambas metodología de cálculo (Hidrograma unitario SCS y Onda cinemática), esto es, el patrón de distribución de la precipitación y los valores de los números de curva. Estos se presentaron en los apartados 6.8.2. y 6.6.2.

7.1.Resultados obtenidos con HEC-HMS

7.1.1. Análisis del tamaño de las subcuencas

En este análisis, para el proceso de transformación precipitación neta-escorrentía, se ha utilizado el método del SCS y el método de la Onda Cinemática, en ambos métodos, el tránsito del cauce se realizará mediante Muskingum-Cunge, con el fin de poder obtener datos de caudales que permitan contrastar la sensibilidad entre resultados de subcuencas con distintos tamaños.

En el caso del SCS, se ha observado que, para las subcuencas menores de 50 km² los caudales son ligeramente superiores a los caudales correspondientes con las subcuencas mayores de 100 km². Por otro lado, los hidrogramas presentan una forma peculiar al final del tramo, esto puede deberse a la distribución considerada para la subcuencas. Sobre esto, hay que destacar que, en el estudio que se realizó en 2007 sobre la Rambla de Benipila (*“Metodología para el estudio de avenidas en ramblas de cuencas mediterráneas utilizando Sistemas de Información Geográfica y Modelos Semidistribuidos”*), situada en el término municipal de Cartagena, se obtuvieron unos hidrogramas de salida con una forma similar a los de la Rambla del Albujón, lo que valdría como contrastación.

Debido al gran número de subcuencas que forman la cuenca se mostrarán únicamente hidrogramas de salida de la cuenca completa para cada periodo de retorno. Con esto se conseguirá una comparación de la magnitud caudal según el tamaño de las subcuencas.

Los hidrogramas resultantes con el método del SCS mediante HEC-HMS son los siguientes:

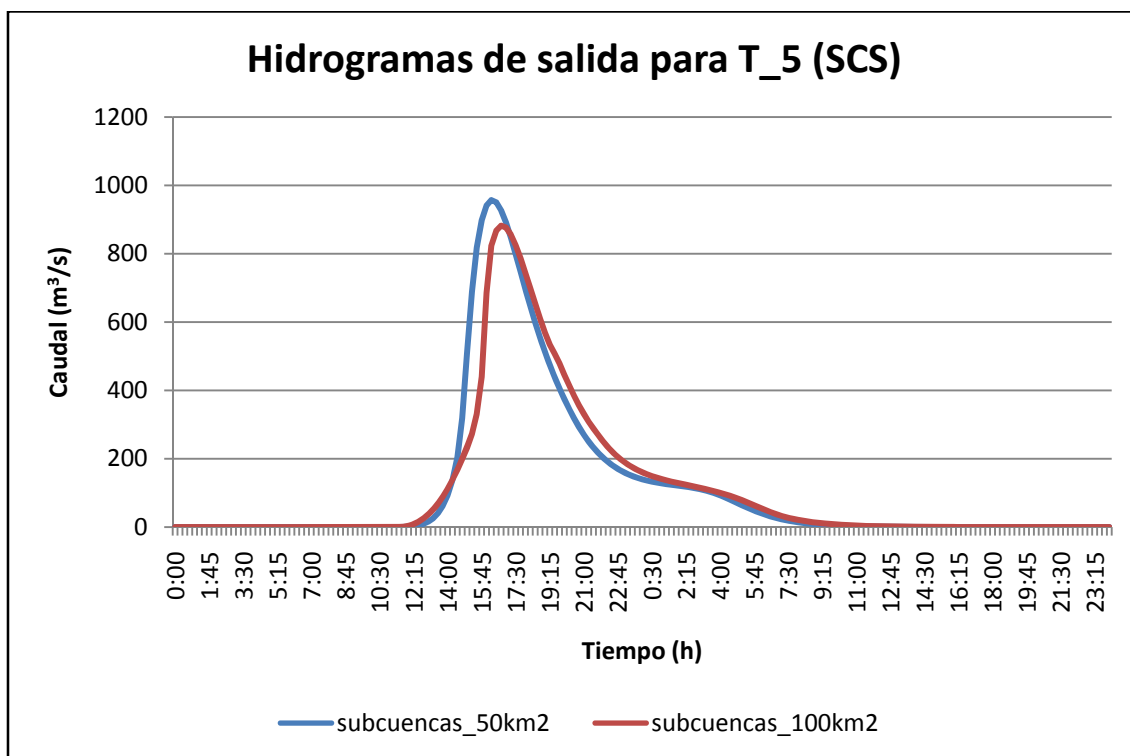


Fig. 8.1. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 5 años

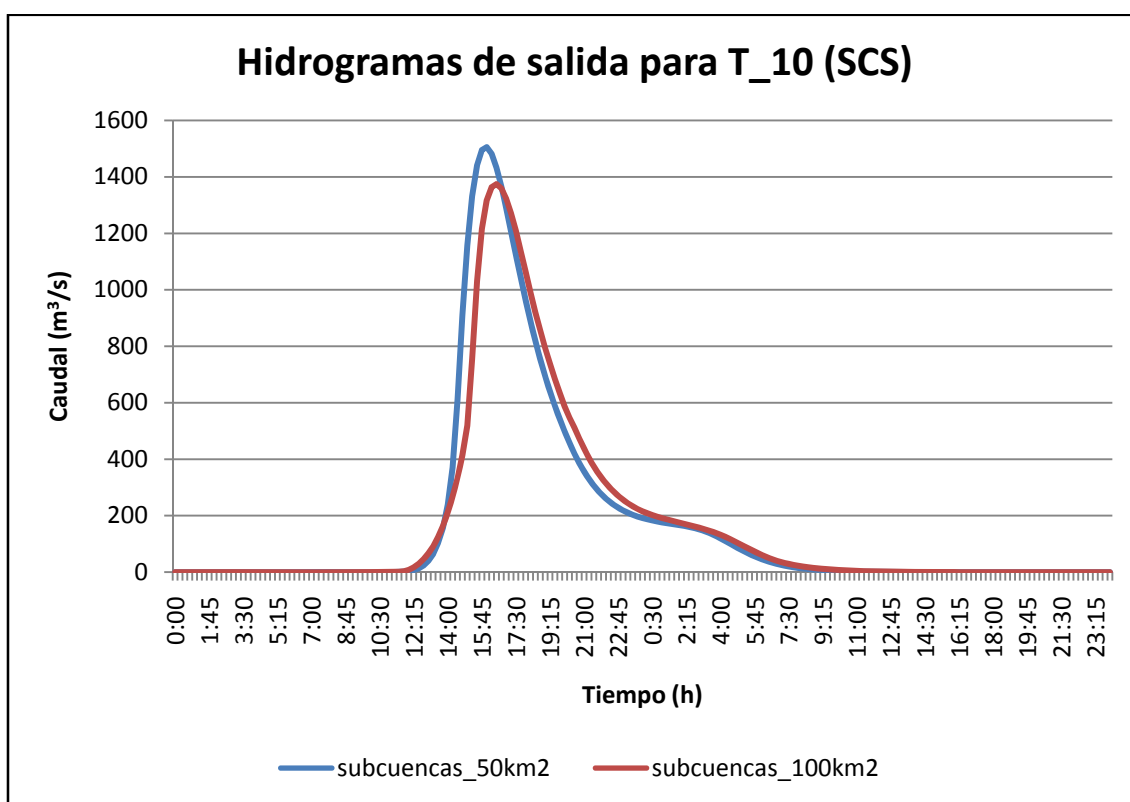


Fig. 8.2. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 10 años

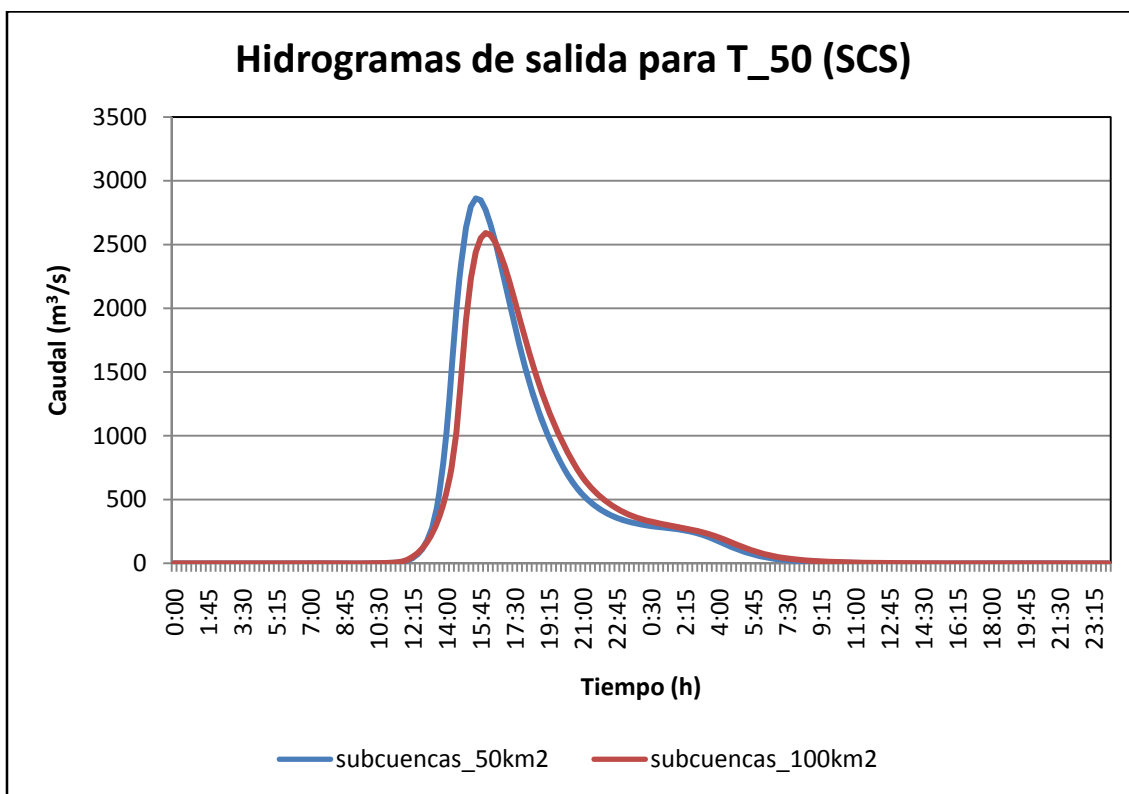


Fig. 8.3. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 50 años

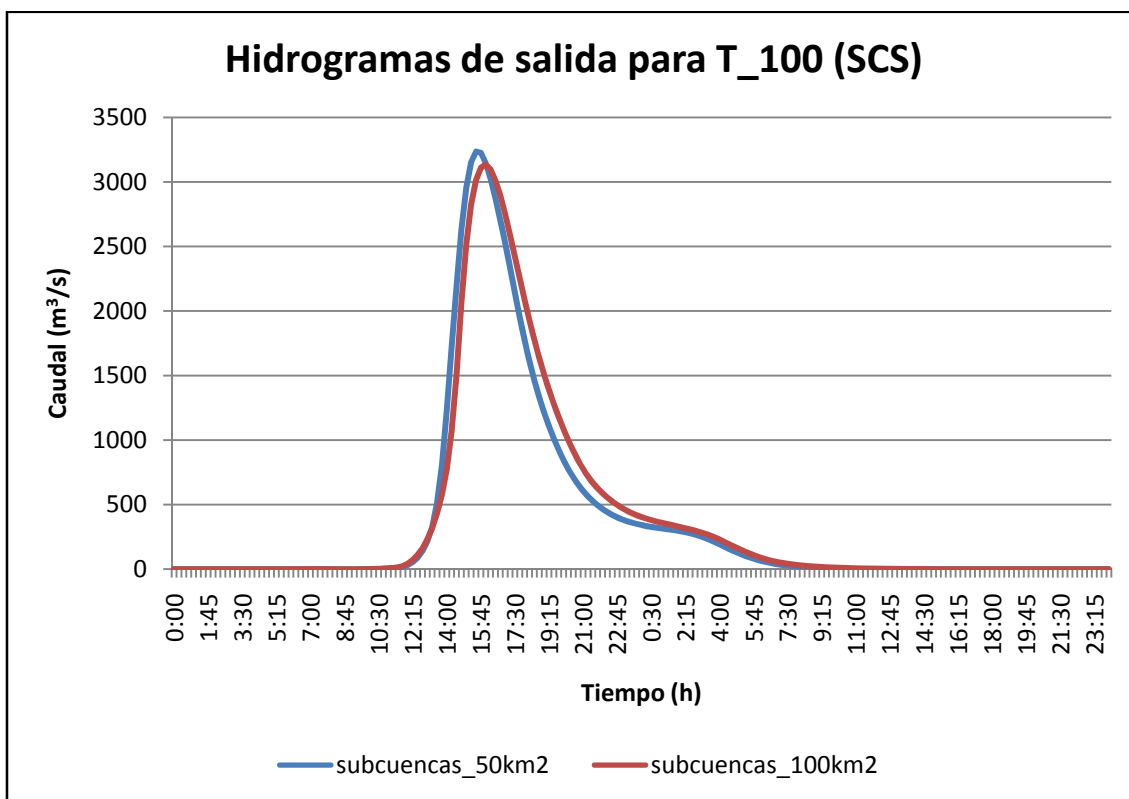


Fig. 8.4. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 100 años

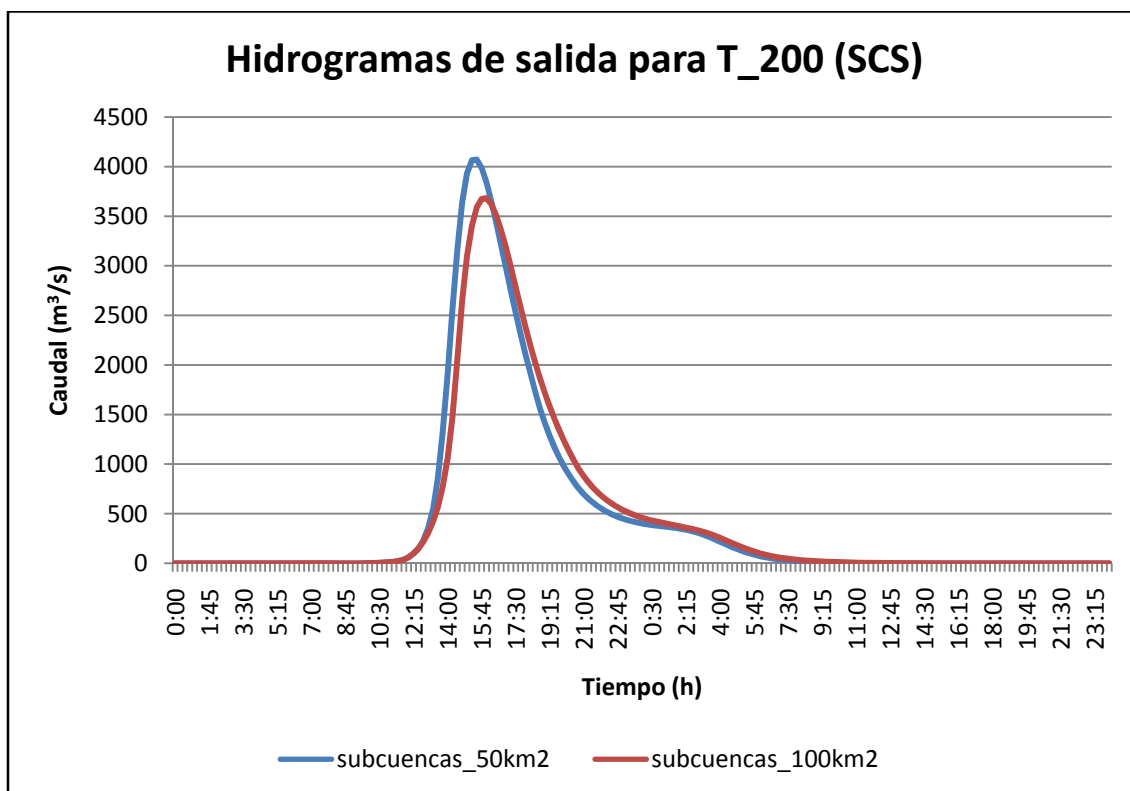


Fig. 8.5. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 200 años

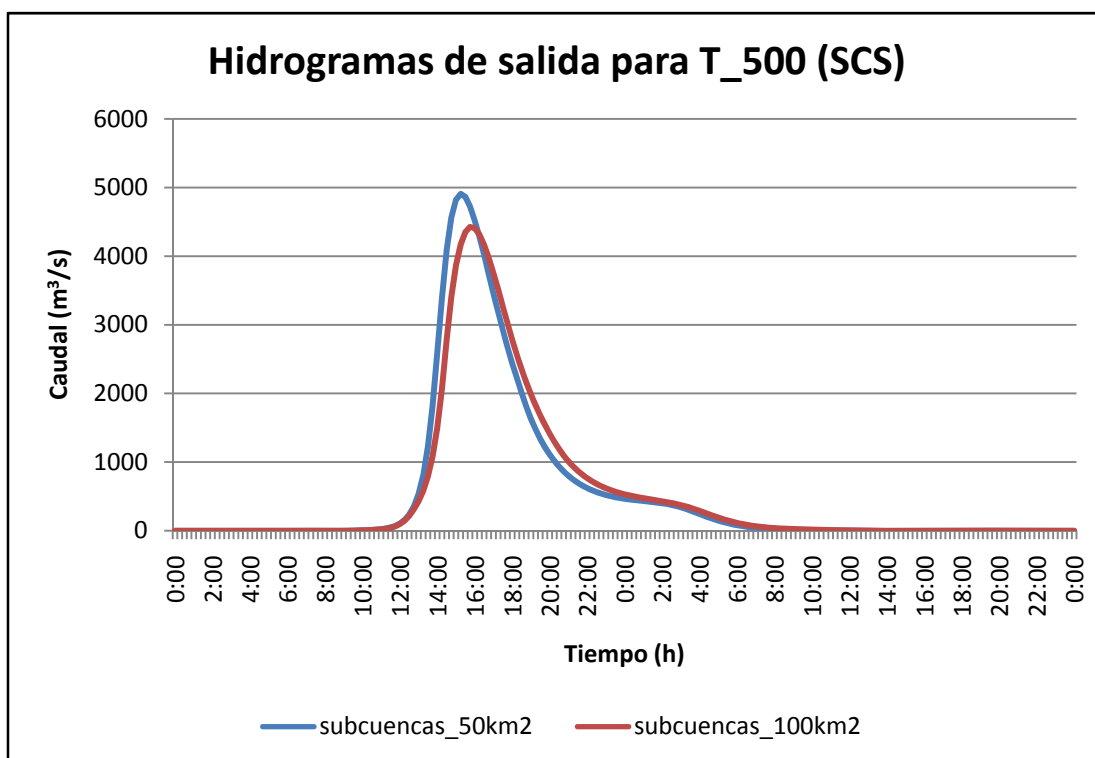


Fig. 8.6. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 500 años

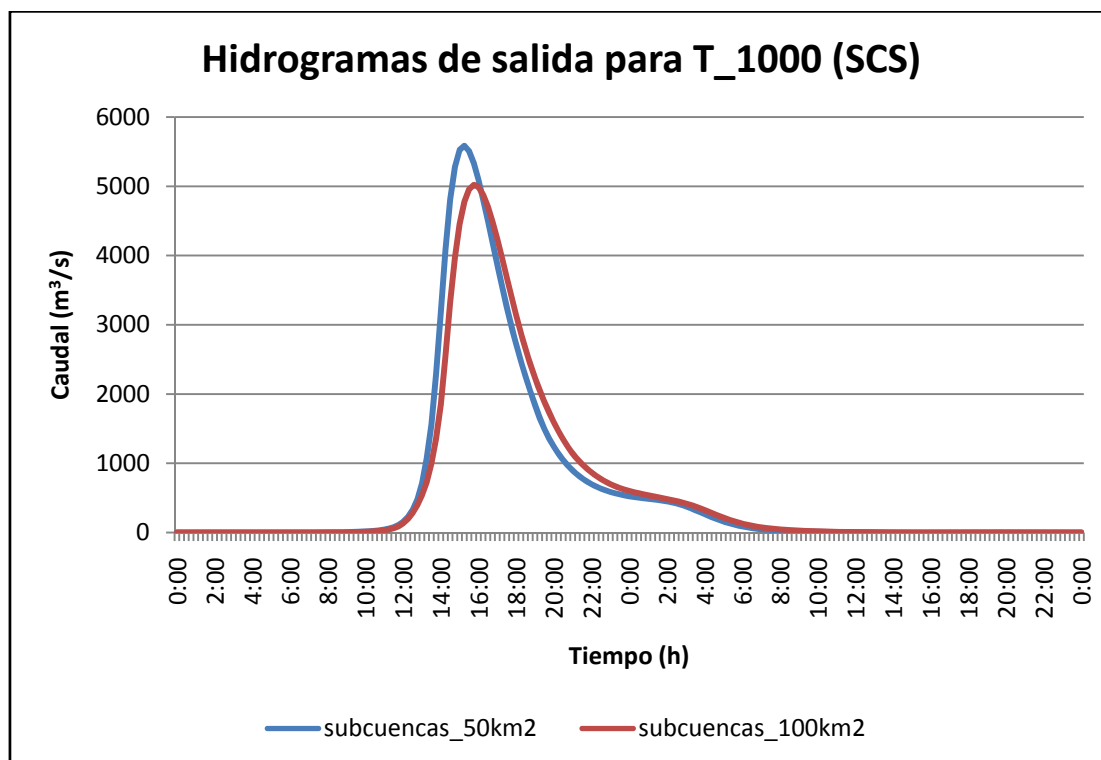


Fig. 8.7. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 1000 años

En los hidrogramas anteriores se observa que los caudales resultantes para las subcuencas menores de 50 km² son ligeramente superiores a los caudales resultantes en las subcuencas mayores de 100 km². Esto indica que, a menor superficie de estudio mayor precisión de los datos.

Para poder analizar con mayor exactitud las diferencias entre los hidrogramas para cada periodo de retorno se muestran unas tablas donde se compara el caudal pico de ambos hidrogramas, así como los volúmenes y el tiempo de retardo entre un hidrograma y otro.

Los resultados de esta comparación están referidos a los datos producidos por el hidrograma de las subcuencas menores de 50 km². Se muestran en porcentaje excepto el tiempo de retardo que está en minutos.

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	985	1553,5	2947,5	3340,9	4193,9	5051,9	5584,5
> 100km ²	907,1	1414	2663,4	3224	3788,2	4552,6	5019,2
Diferencia	77,9	139,5	284,1	116,9	405,7	499,3	565,3
%	7,91	8,95	9,63	3,49	9,67	9,88	10,12

Tabla 8.1. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Volumen del hidrograma (mm)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	29,13	44,2	81,16	92,13	114,32	136,92	151,26
> 100km ²	28,55	43,48	80,04	96,49	113,27	135,84	150,27
Diferencia	0,58	0,72	1,12	-4,36	1,05	1,08	0,99
%	1,99	1,62	1,37	-4,73	0,91	0,79	0,65

Tabla 8.2. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
SCS	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	16:15	16:00	15:30	15:30	15:30	15:15	15:15
> 100km ²	16:45	16:30	16:00	16:00	16:00	15:45	15:45
Diferencia	30	30	30	30	30	30	30

Tabla 8.3. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método del SCS para los dos tamaños de subcuencas

Observando las tablas se puede comentar lo siguiente:

- En primer lugar comentar que, el caudal pico del hidrograma para las subcuencas menores de 50 km² es superior al caudal pico del hidrograma para las subcuencas mayores de 100 km². Para el periodo de retorno de 100 años esta diferencia es muy pequeña, del 3,49%, sin embargo, va aumentando conforme lo hace el periodo de retorno, llegando hasta un 10,12% para el periodo de retorno de 1000 años.
- Con respecto al volumen total de los hidrogramas, las subcuencas menores de 50 km² contienen un volumen total ligeramente superior al de las subcuencas de mayor tamaño, excepto para el periodo de retorno de 100 años, donde el volumen total que recogen las subcuencas mayores supera en un 4,73% al volumen de las subcuencas más pequeñas.
- En el caso del tiempo pico de cada hidrograma, se aprecia claramente, tanto en la tabla como en los gráficos, el retraso de unos 30 minutos del hidrograma que presentan las subcuencas más grandes con respecto al tiempo pico del hidrograma correspondiente a las subcuencas menores de 50 km², para todos los periodos de retorno.

Después de estas comparaciones se aprecia claramente la influencia del tamaño de las subcuencas en los resultados obtenidos. A menor tamaño de cuenca mayor precisión de los resultados.

Para el caso de la Onda Cinemática (Kinematic Wave), la simulación se ha realizado de manera más costosa, ya que fue necesario introducir en el programa un coeficiente de rugosidad “N” y el porcentaje de terreno permeable e impermeable.

El método de la onda cinemática está diseñado principalmente para la representación de las zonas urbanas, lo que indica que se trata de un buen método para aquellas zonas que prácticamente carecen de pendiente, como es el caso.

Al realizar la simulación con este método han aparecido una serie de advertencias relacionadas con el tránsito de la avenida debido a la forma de las secciones. En algunos puntos concretos fue posible una modificación de dichas secciones y la eliminación de las advertencias. Sin embargo, debido a que no se cuenta con cartografía más precisa, en muchos otros puntos fue imposible su mejora. No obstante, sólo se trata de advertencias del programa que, en todo caso, se considera que no influyen significativamente en los resultados de este análisis.

Los hidrogramas de salida de la cuenca completa aplicando el método de la Onda Cinemática (KW) son los siguientes:

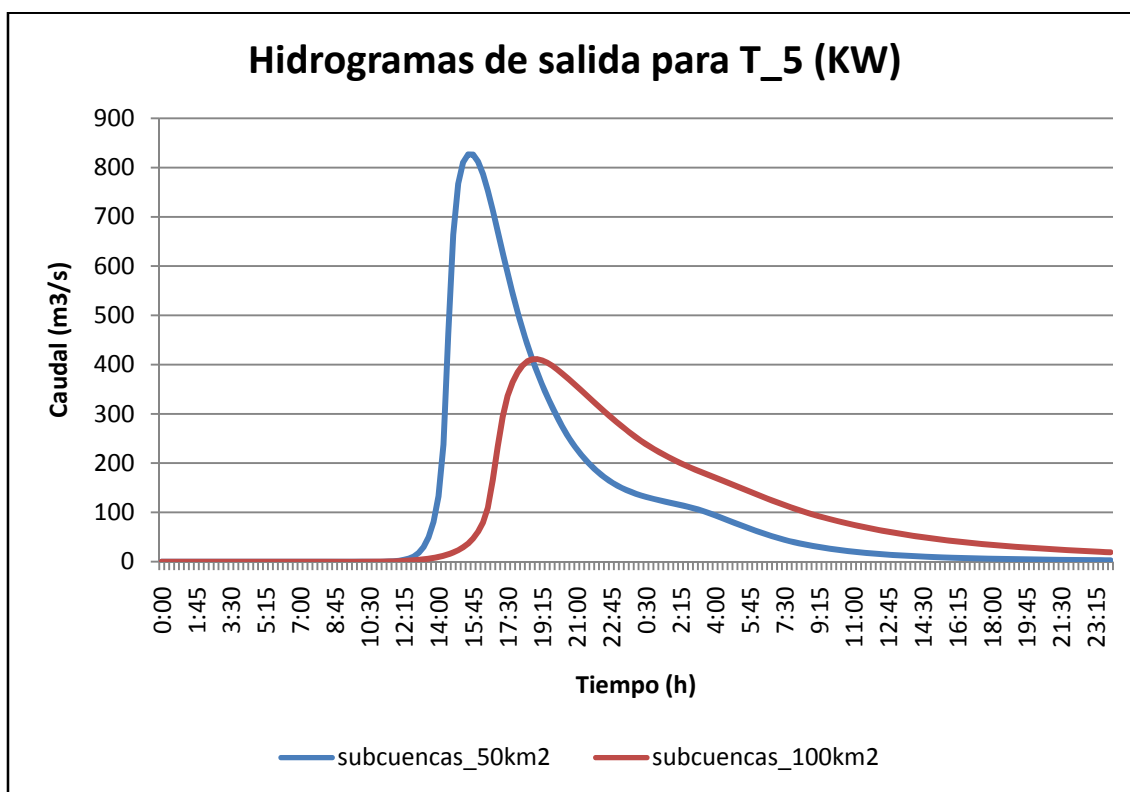


Fig. 8.8. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 5 años

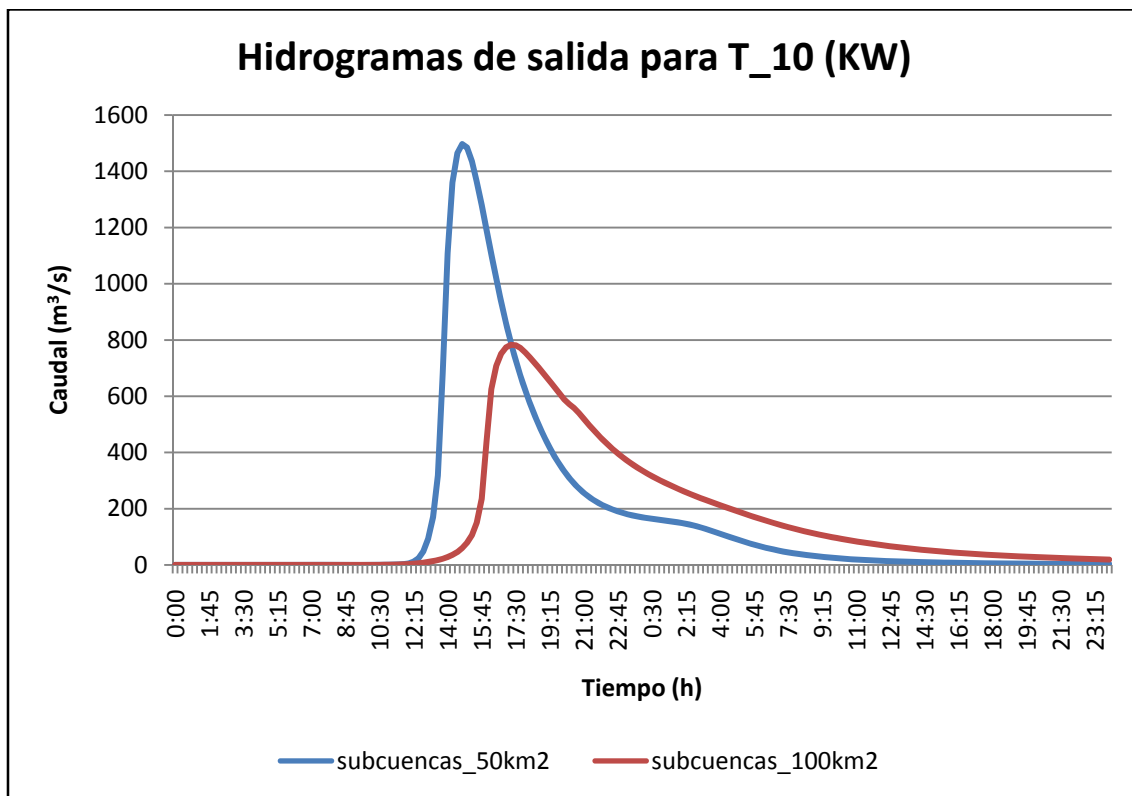


Fig. 8.9. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 10 años

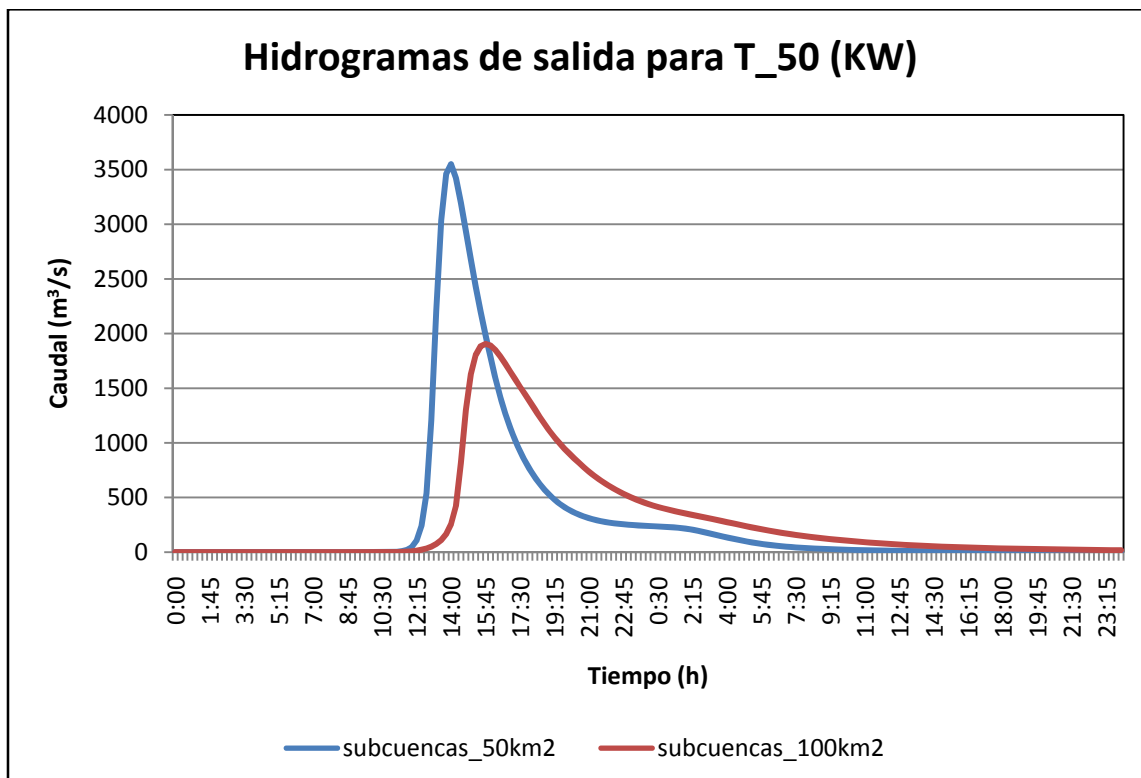


Fig. 8.10. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 50 años

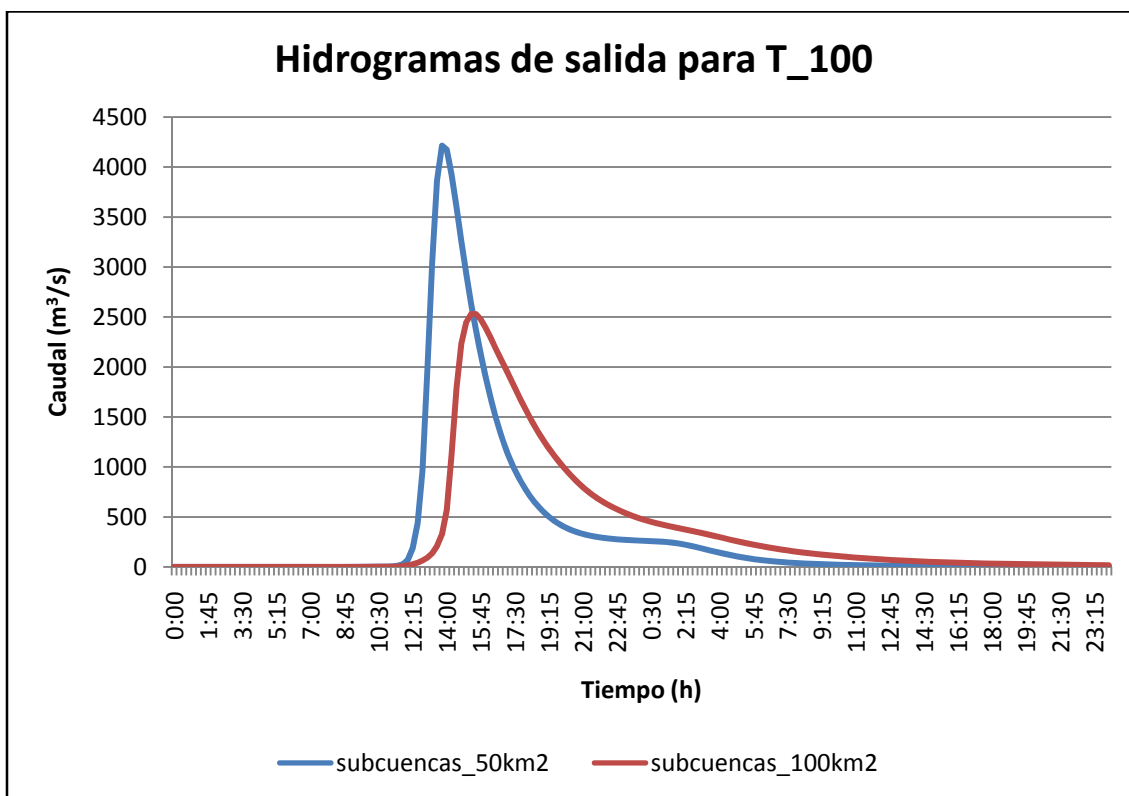


Fig. 8.11. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 100 años

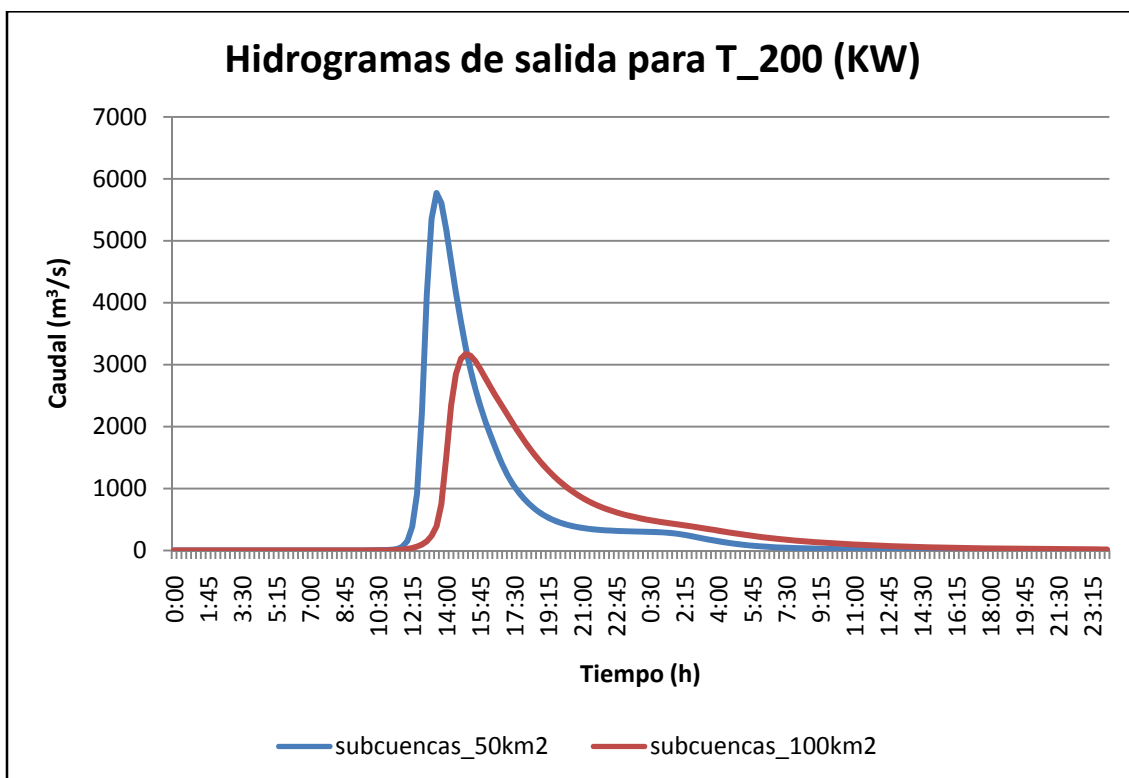


Fig. 8.12. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 200 años

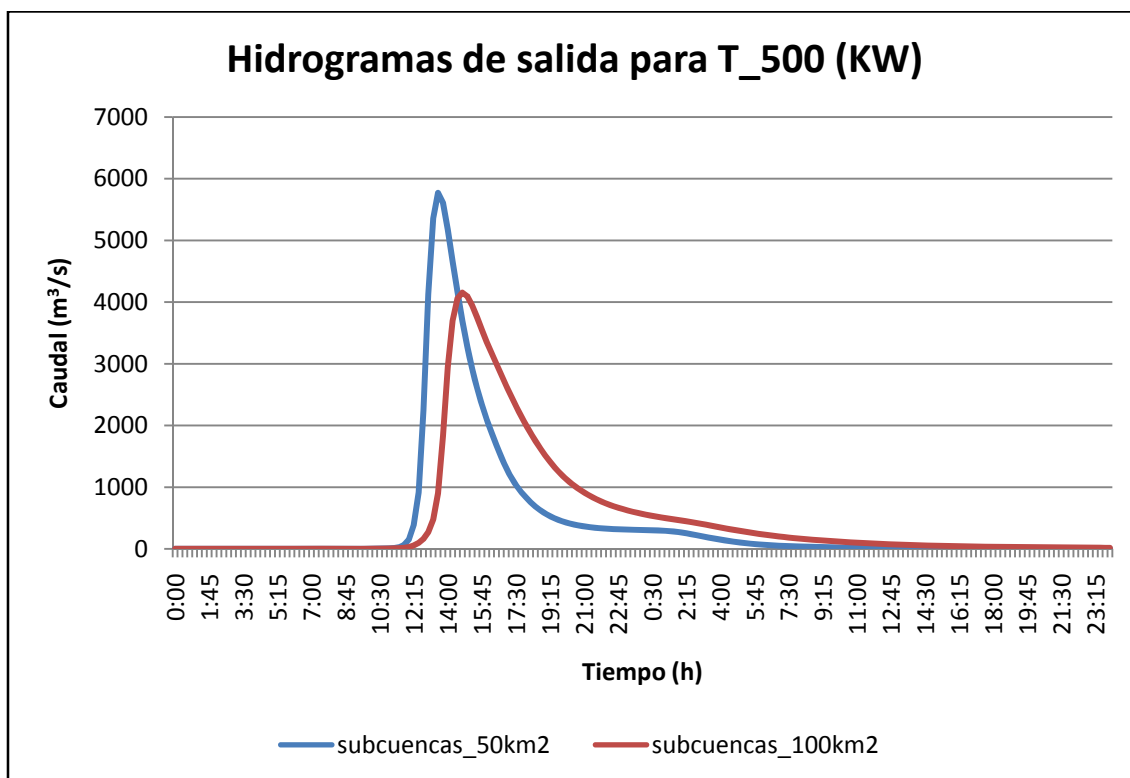


Fig. 8.13. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 500 años

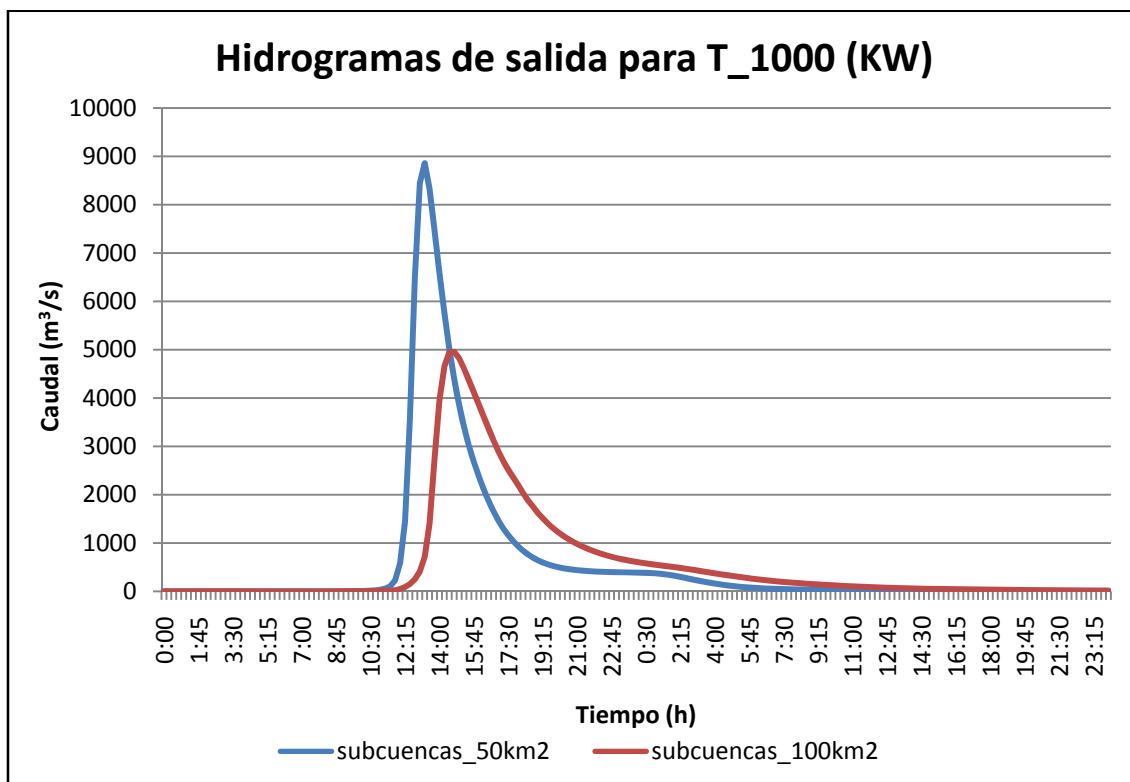


Fig. 8.14. Hidrogramas de salida de la cuenca completa para las subcuencas mayores de 100 km² y menores de 50 km², para el periodo de retorno de 1000 años

En este método se observa claramente que los caudales de salida de la cuenca completa varían mucho en el caso de realizar el proceso con distintos tamaños de cuenca. Para las subcuencas menores de 50 km² los caudales son mucho más elevados que en el caso de las subcuencas mayores de 100 km².

Al igual que para el método anterior, para tener una idea más clara de las diferencias entre los resultados obtenidos según los tamaños de las subcuencas, se muestran las siguientes tablas comparativas.

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	853,2	1544,8	3663	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3
> 100km ²	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,6
Diferencia	430,5	739,5	1699,5	1763,3	2699,4	3301,7	3902,7
%	50,47	47,87	46,39	40,34	45,23	43,50	44,06

Tabla 8.4. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Volumen del hidrograma (mm)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	27,91	42,36	77,7	88,59	109,6	131,79	146,73
> 100km ²	27,04	41,35	76,54	92,62	108,96	131,22	144,9
Diferencia	0,87	1,01	1,16	-4,03	0,64	0,57	1,83
%	3,11	2,38	1,49	-4,55	5,84	4,33	1,25

Tabla 8.5. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
KW	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
< 50 km ²	15:30	14:45	14:00	13:45	13:30	13:15	13:15
> 100km ²	19:00	17:15	15:45	15:15	15:00	14:45	14:45
Diferencia	210	210	105	90	90	30	30

Tabla 8.6. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática para los dos tamaños de subcuencas

En estos resultados se observa que:

- Al igual que en el método del SCS los caudales pico correspondientes a los hidrogramas de las subcuencas menores de 50 km² son superiores a los de las cuencas más grandes para todos los periodos de retorno. Pero con este método las diferencias entre los caudales son mucho más elevadas que en el método anterior. Para el periodo de retorno de 5 años la variación es de un 50,47%, mientras que para el periodo de retorno de 1000 años la diferencia entre los caudales pico de ambos hidrogramas es de un 44,09%.

- En cuanto a los volúmenes, para las subcuencas más pequeñas se observa un volumen total de la cuenca completa en el punto de salida mayor que para las subcuencas más grandes. Igual que en el método del SCS para el periodo de retorno de 100 años el volumen registrado por las subcuencas mayores de 100 km^2 supera el volumen recogido por las subcuencas más pequeñas.
- En el análisis de los tiempos pico de cada hidrograma se observa un retardo del hidrograma correspondiente a las subcuencas más grandes con respecto al otro. Este retraso se ve disminuido con el aumento del periodo de retorno; para un periodo de retorno de 5 años la diferencia de tiempo entre los picos de los hidrogramas es de 210 minutos mientras que para el periodo de retorno de 1000 años el retardo es tan sólo de 30 minutos.

Como se comentó anteriormente este método es aconsejable para zonas donde la pendiente es casi nula. En la cuenca del Albuñón esta condición se cumple a la perfección. Sin embargo, en los resultados se observa un mal ajuste del hidrograma correspondiente a las subcuencas mayores de 100 km^2 .

7.1.2. Análisis entre los métodos de propagación

A continuación se va a realizar una comparación entre los diferentes métodos aplicados a la cuenca para conseguir la transformación de la precipitación neta-esorrentía, para un mismo tamaño de cuenca.

En primer lugar se compararán los resultados obtenidos para las subcuencas menores de 50 km^2 , tanto para el método del SCS como para el método de la Onda Cinemática.

Los hidrogramas de salida de la cuenca completa para ambos métodos son los siguientes:

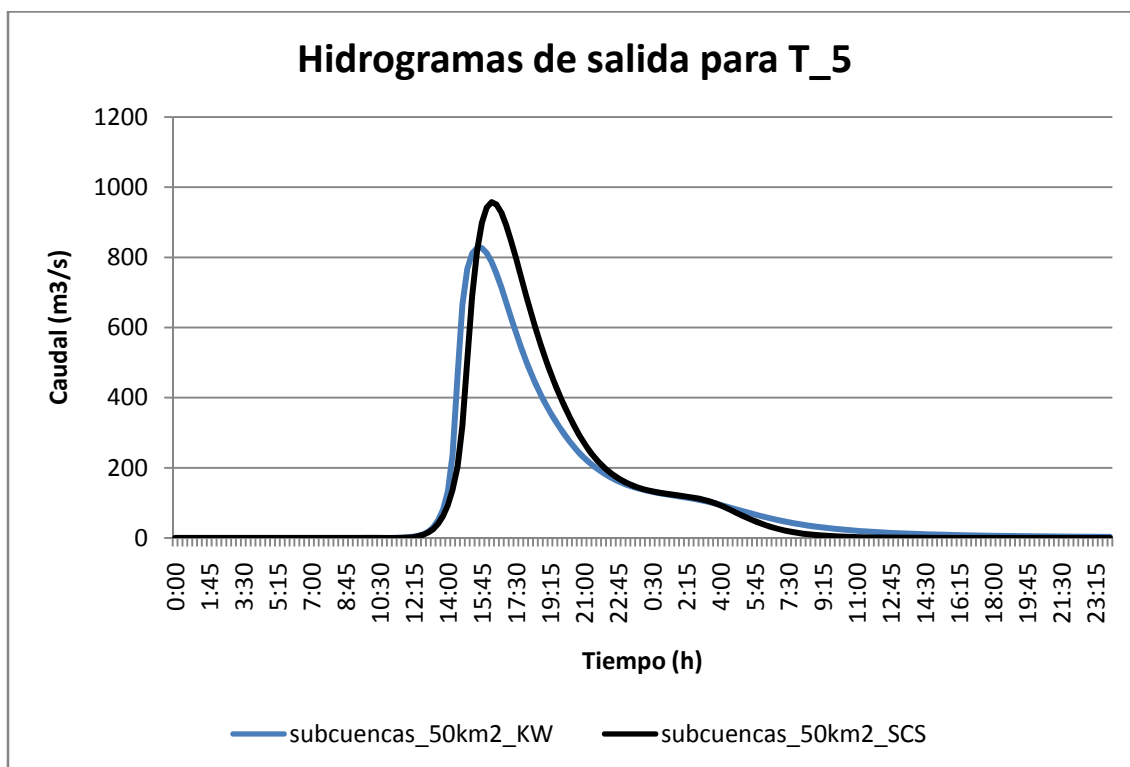


Fig. 8.15. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 5 años

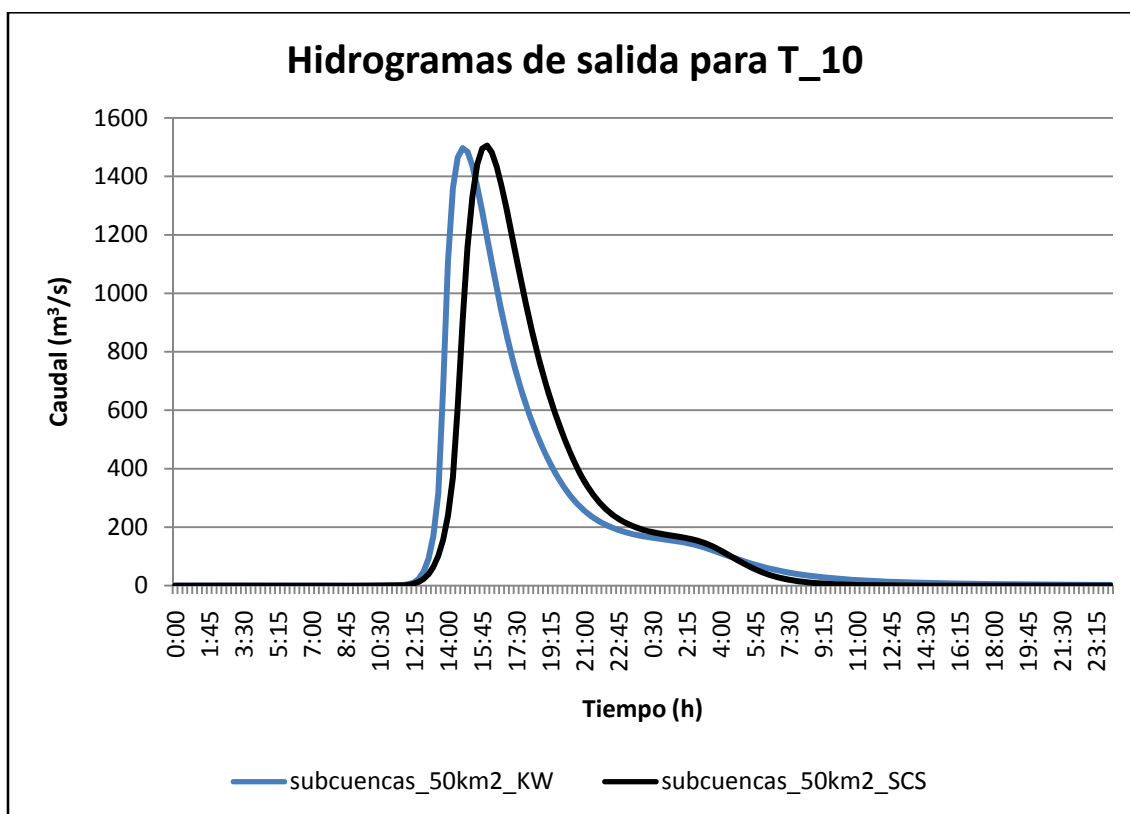


Fig. 8.16. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 10 años

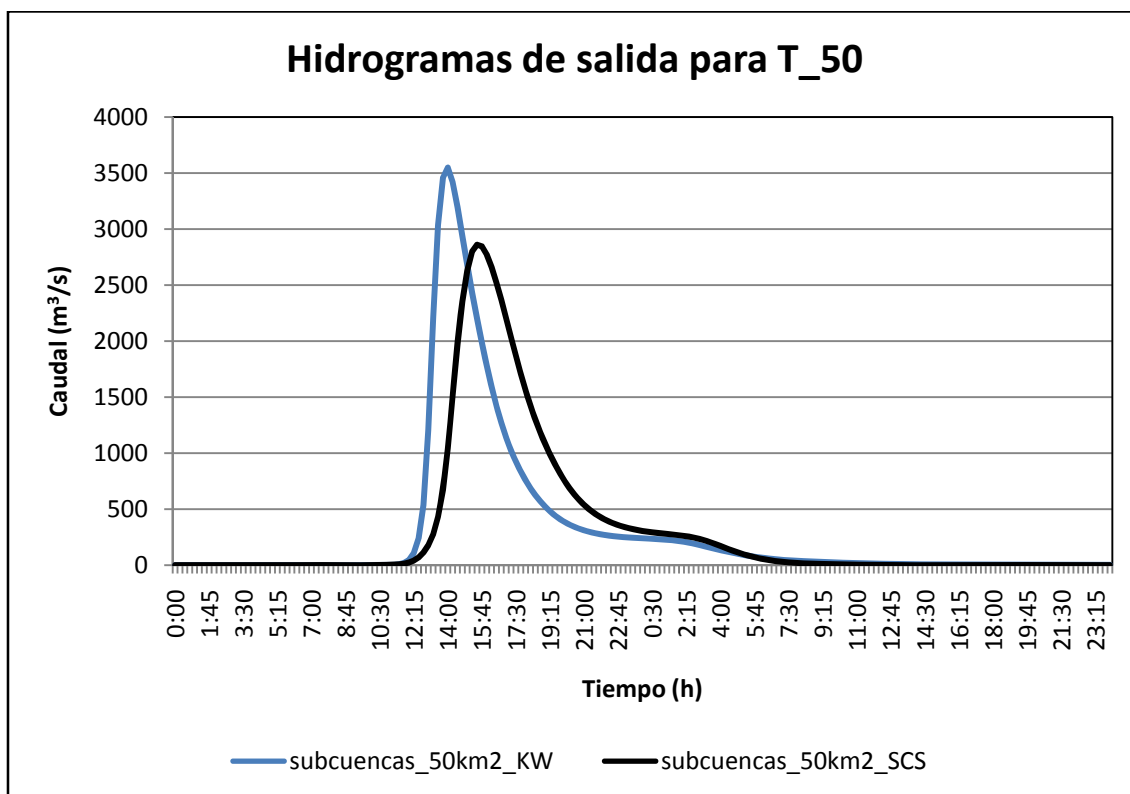


Fig. 8.17. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 50 años

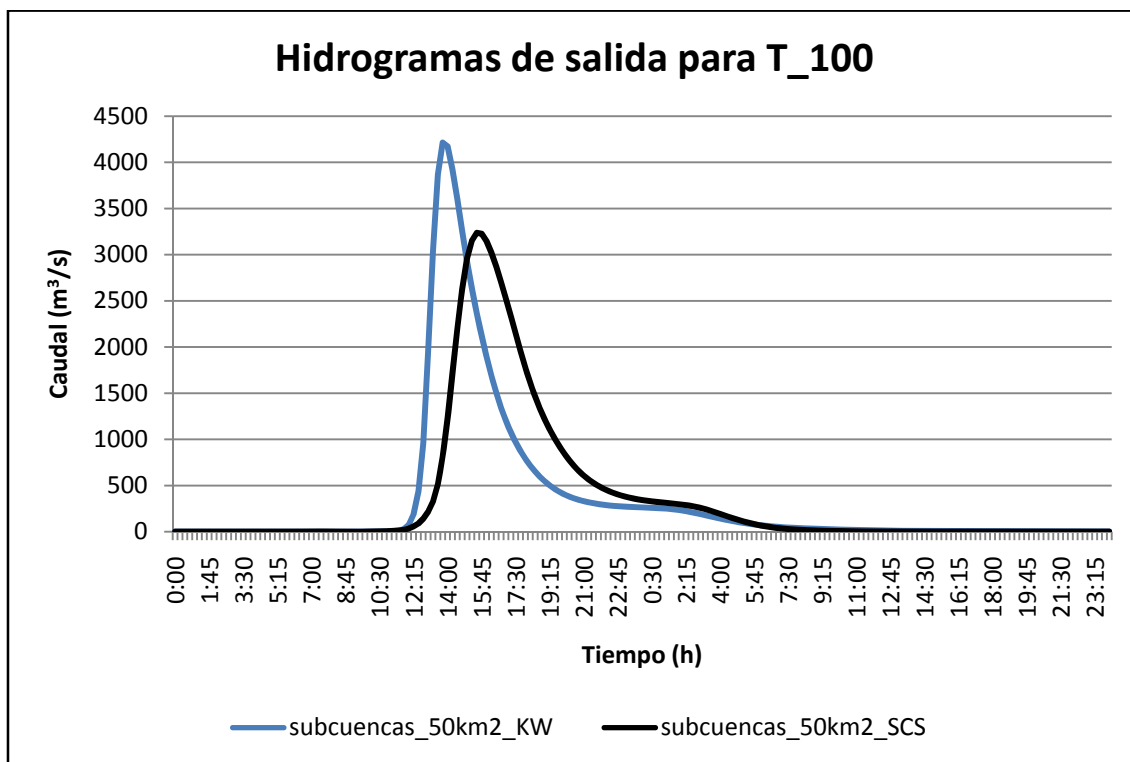


Fig. 8.18. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 100 años

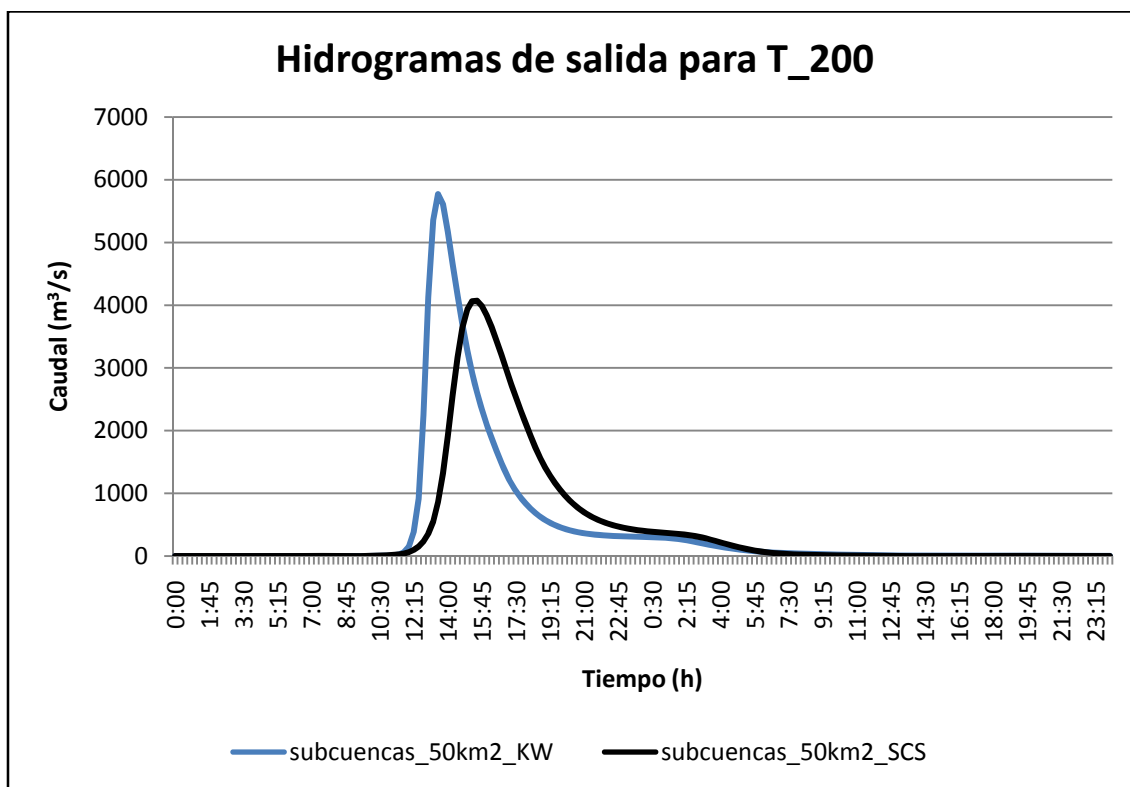


Fig. 8.19. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 200 años

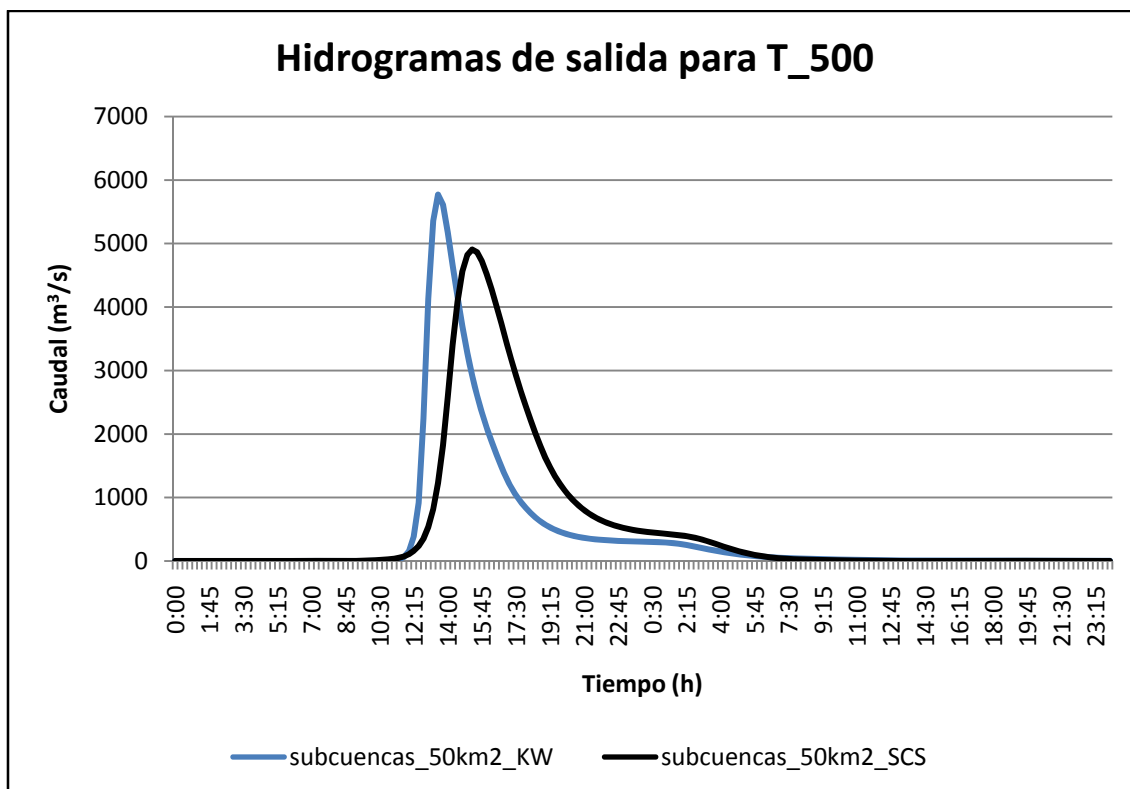


Fig. 8.20. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 500 años

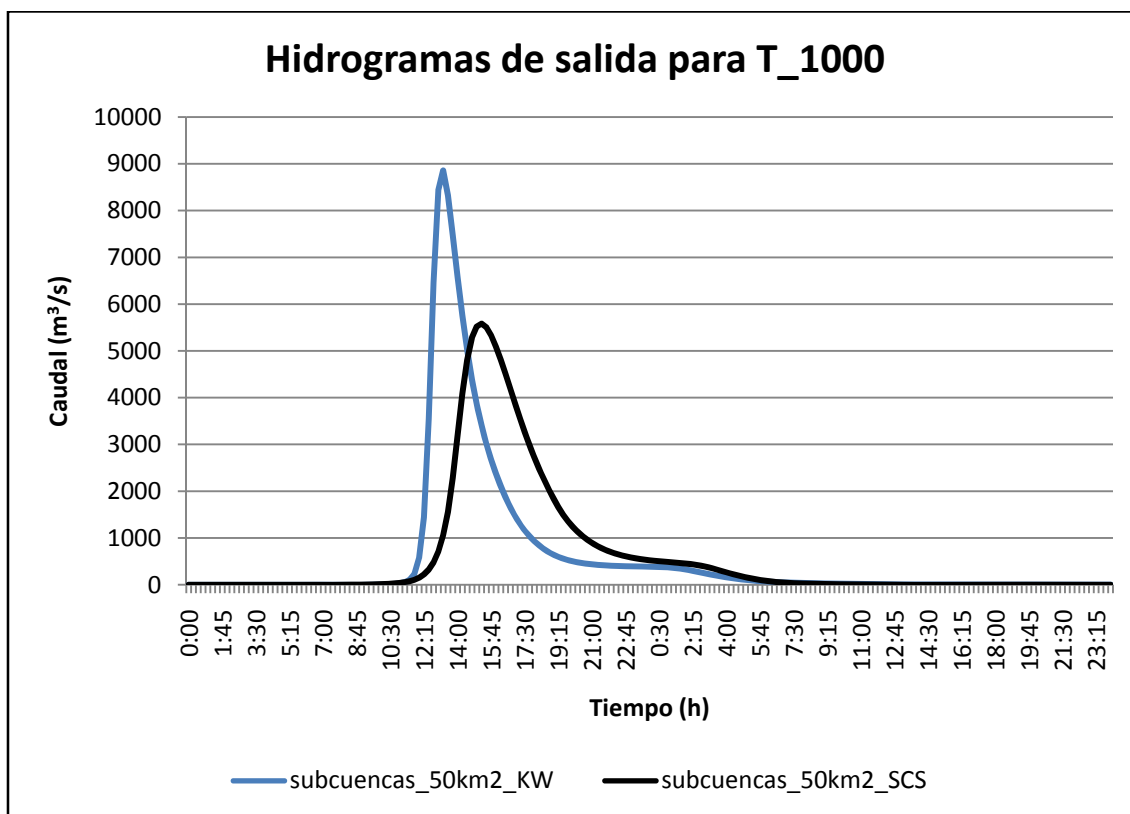


Fig. 8.21. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas menores de 50 km² y para el periodo de retorno de 1000 años

En la comparación de los dos métodos usados para la propagación de la avenida se aprecian claras diferencias entre los caudales para periodos de retorno altos.

Es curioso observar que el hidrograma originado por el método de la Onda Cinemática se adelanta al obtenido con el método del SCS para todos los periodos de retorno estudiados.

A continuación se muestran las tablas comparativas de los resultados.

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	985	1553,5	2947,5	3340,9	4193,9	5051,9	5584,5
KW	853,2	1544,8	3663	4370,3	5967,7	7588,8	8857,3
Diferencia	131,8	8,7	-715,5	-1029,4	-1773,8	-2536,9	-3272,8
%	13,38	0,56	-24,27	-30,81	-42,29	-50,21	-58,60

Tabla 8.7. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Volumen del hidrograma (mm)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	29,13	44,2	81,16	92,13	114,32	136,92	151,26
KW	27,91	42,36	77,7	88,59	109,6	131,79	146,73
Diferencia	1,22	1,84	3,46	3,54	4,72	5,13	4,53
%	4,18	4,16	4,26	3,84	4,12	3,75	2,99

Tabla 8.8. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
< 50 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	16:15	16:00	15:30	15:30	15:30	15:15	15:15
KW	15:30	14:45	14:00	13:45	13:30	13:15	13:15
Diferencia	-45	-90	-90	-105	-120	-120	-120

Tabla 8.9. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas menores de 50 km²

Con los datos representados en las tablas se tiene una idea más clara de las diferencias existentes entre los dos métodos.

Los datos están referidos al método del SCS, por tanto, valores negativos representan valores de la Onda Cinemática superiores.

- En el caso de los caudales pico se observa una tendencia curiosa. Para los periodos de retorno más pequeños el método del SCS se impone ligeramente sobre el método de la Onda Cinemática. Por el contrario, a partir del periodo de retorno de 50 años el método de la Onda Cinemática presenta un valor del caudal pico superior al obtenido con el otro método y este valor va aumentando conforme lo hace el periodo de retorno. Esto podría deberse a que el método de la Onda Cinemática es muy sensible a los valores del coeficiente de rugosidad “N” para caudales pequeños. Para caudales más elevados, al tratarse de un método principalmente aplicable a zonas planas, la metodología que utiliza para conseguir la laminación de la avenida hace que se obtengan mejores resultados que los que se obtienen con el otro método.
- Los volúmenes registrados con ambos métodos son muy similares, apenas varían en un 4% como máximo, siendo el método del SCS el que registra un mayor volumen en todos los periodos de retorno estudiados.
- Respecto al tiempo pico de los hidrogramas se puede ver claramente que el hidrograma correspondiente al método de la Onda Cinemática se adelanta, para todos

los periodos de retorno, con respecto al método del SCS. A mayores valores del periodo de retorno mayor retraso del hidrograma del SCS.

Por tanto, después de estas comparaciones se podría decir que ambos métodos tienen resultados similares para los tamaños de las subcuencas más pequeños. Como se verá a continuación esto no ocurre para los tamaños de las subcuencas más grandes.

Por último se analizarán las diferencias que puedan haber entre los dos métodos de estudio aplicados a las subcuencas mayores de 100 km². Al igual que en los casos anteriores se muestran los hidrogramas de salida de la cuenca completa para ambos métodos y para cada periodo de retorno estudiado.

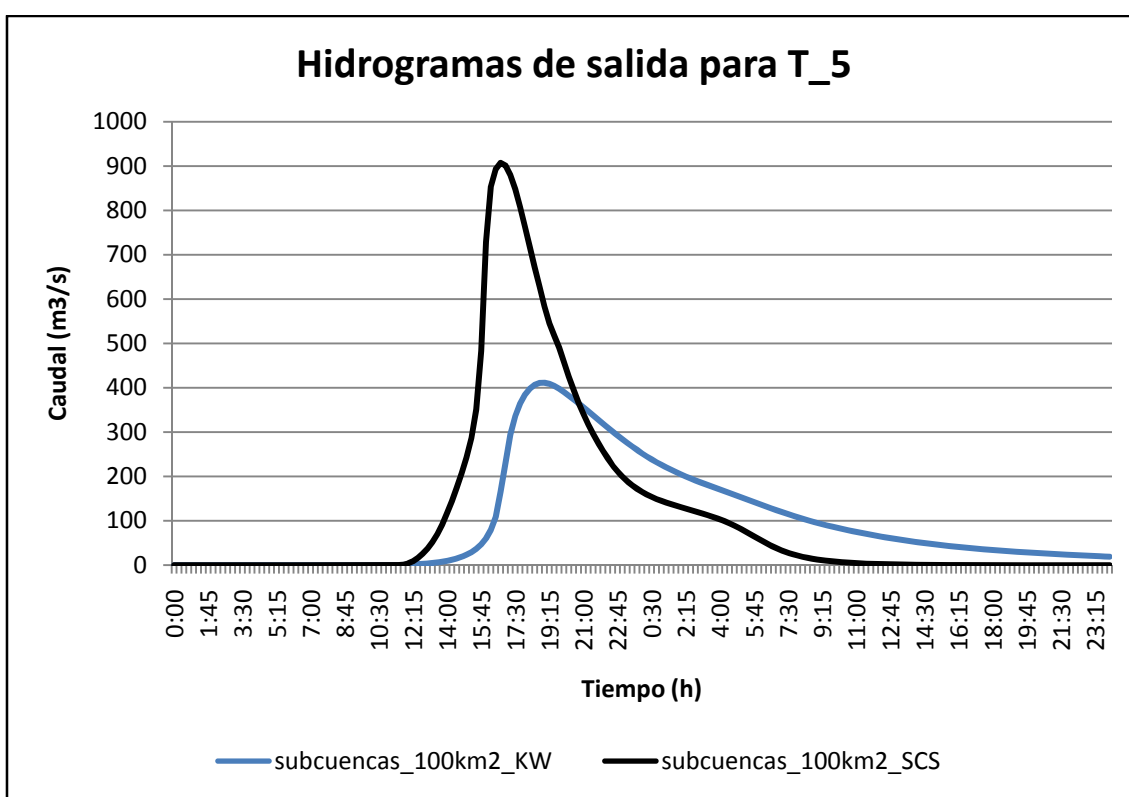


Fig. 8.22. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para el periodo de retorno de 5 años

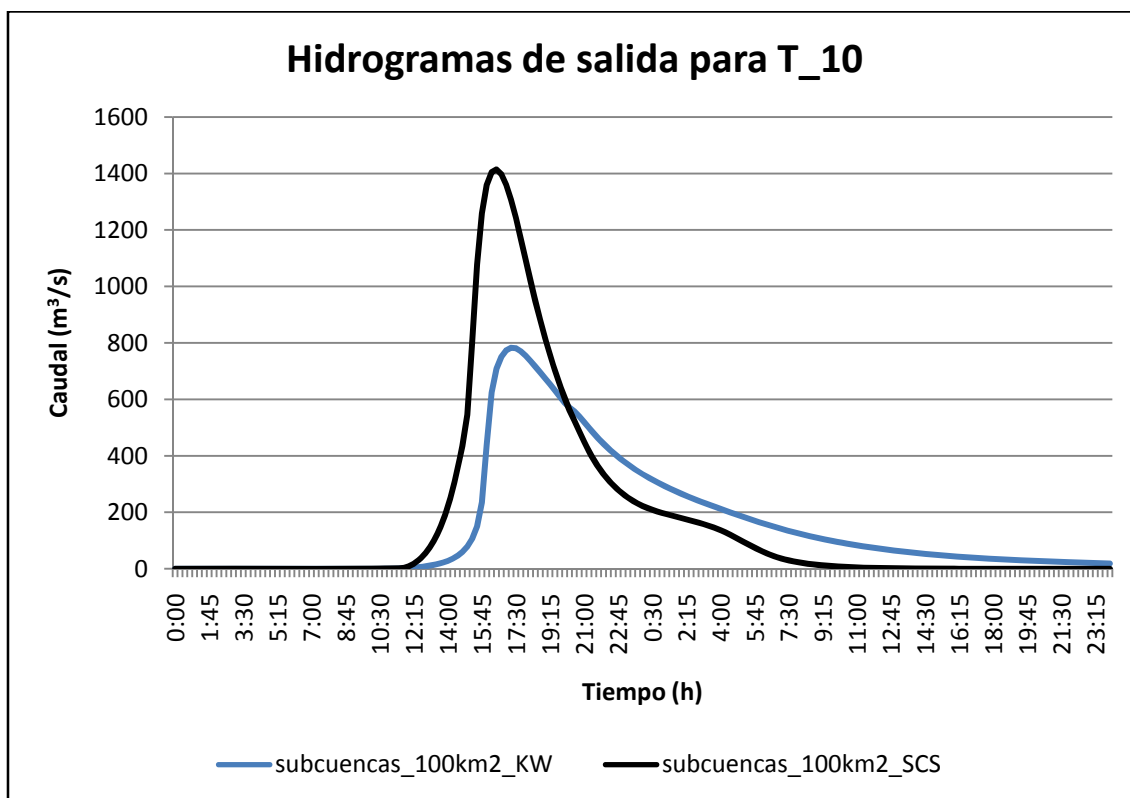


Fig. 8.23. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para el periodo de retorno de 10 años

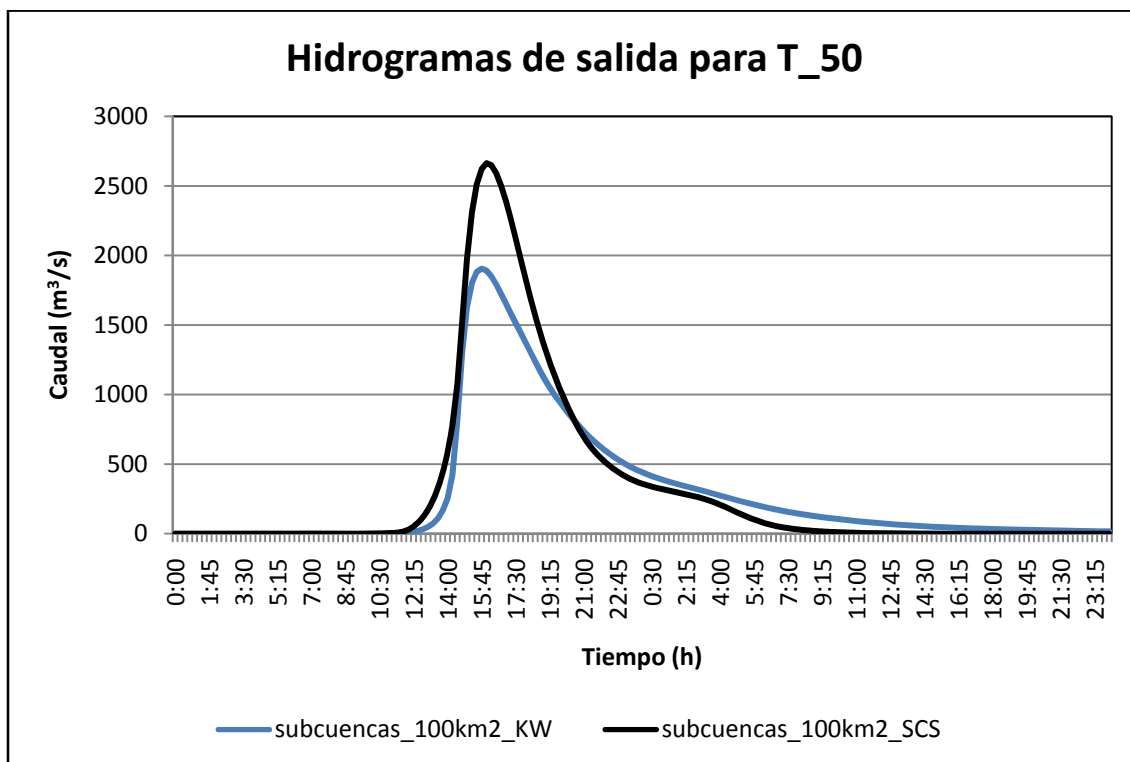


Fig. 8.24. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para el periodo de retorno de 50 años

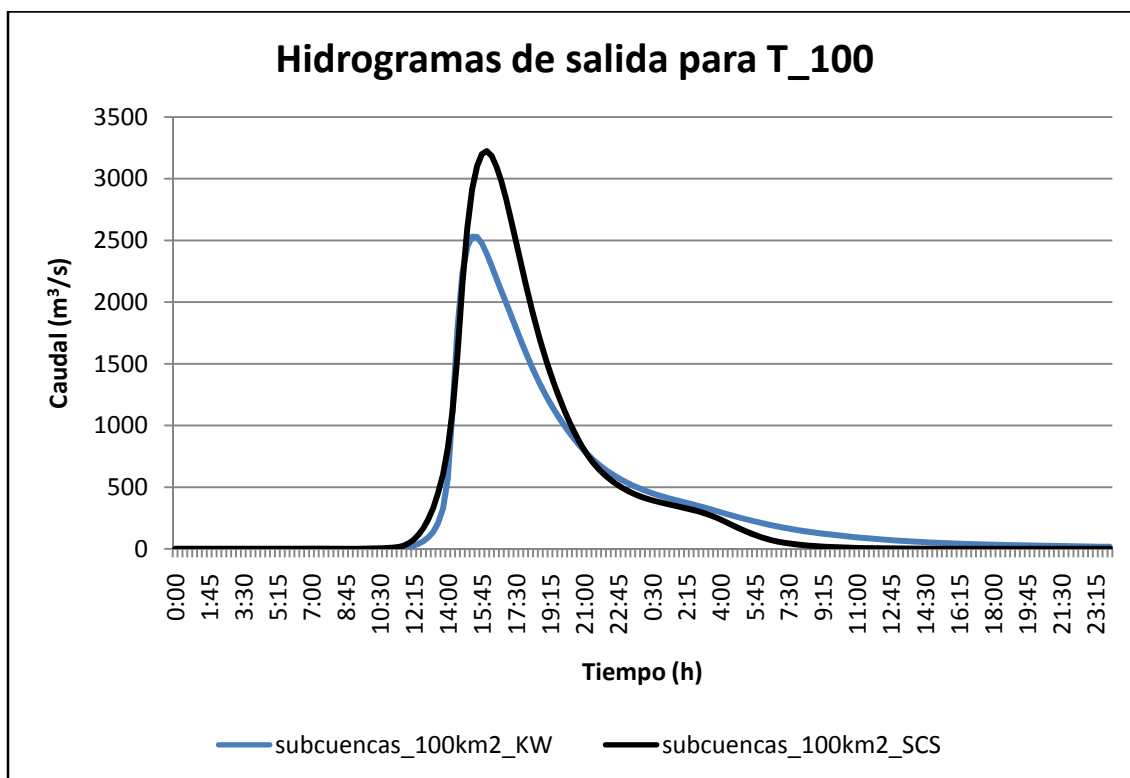


Fig. 8.25. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para el periodo de retorno de 100 años

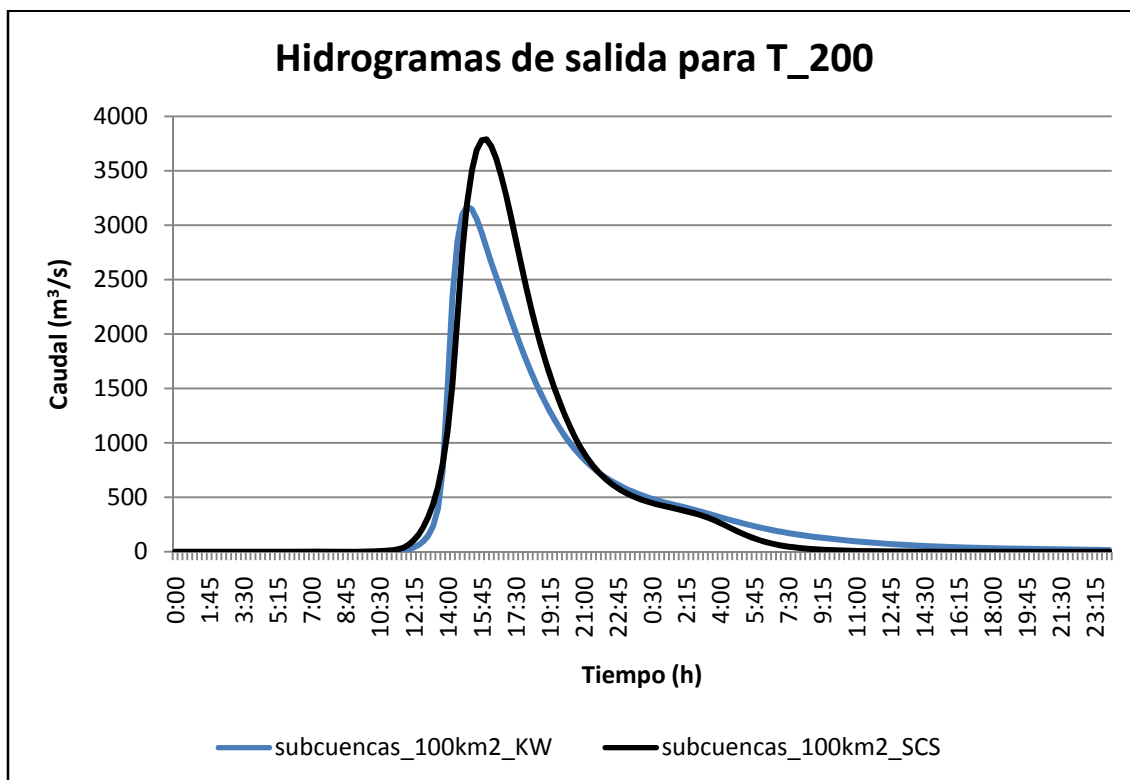


Fig. 8.26. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km² y para el periodo de retorno de 200 años

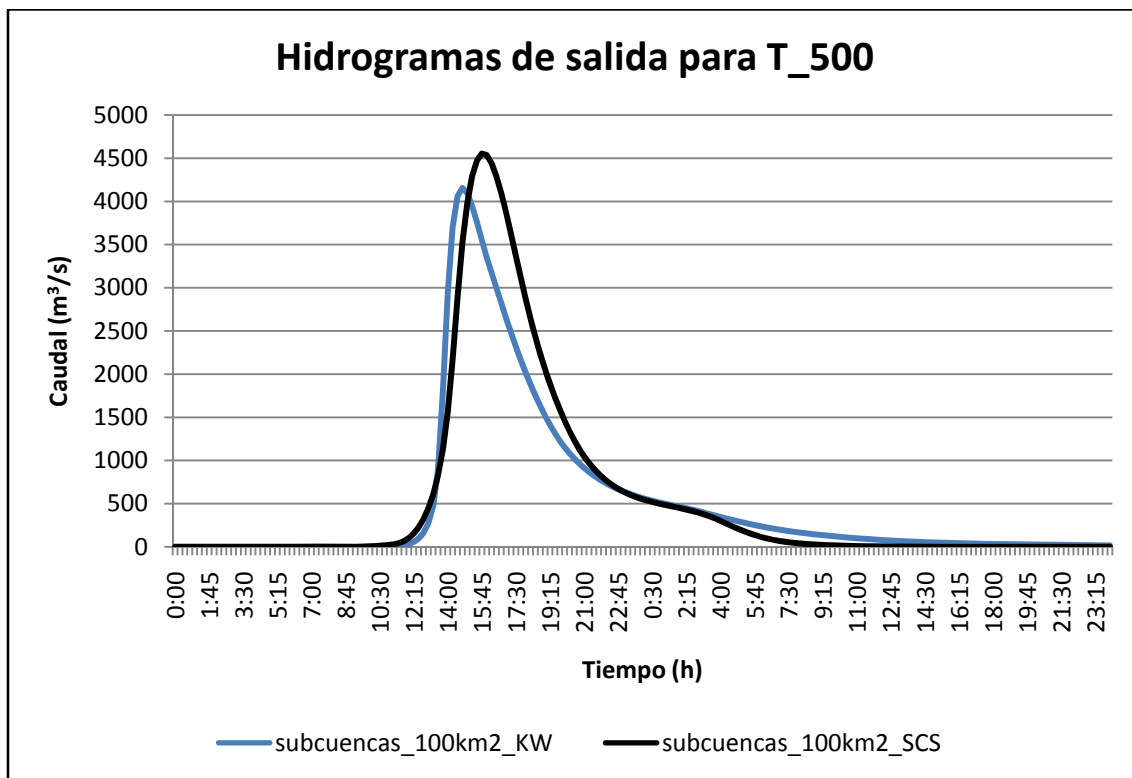


Fig. 8.27. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km^2 y para el periodo de retorno de 500 años

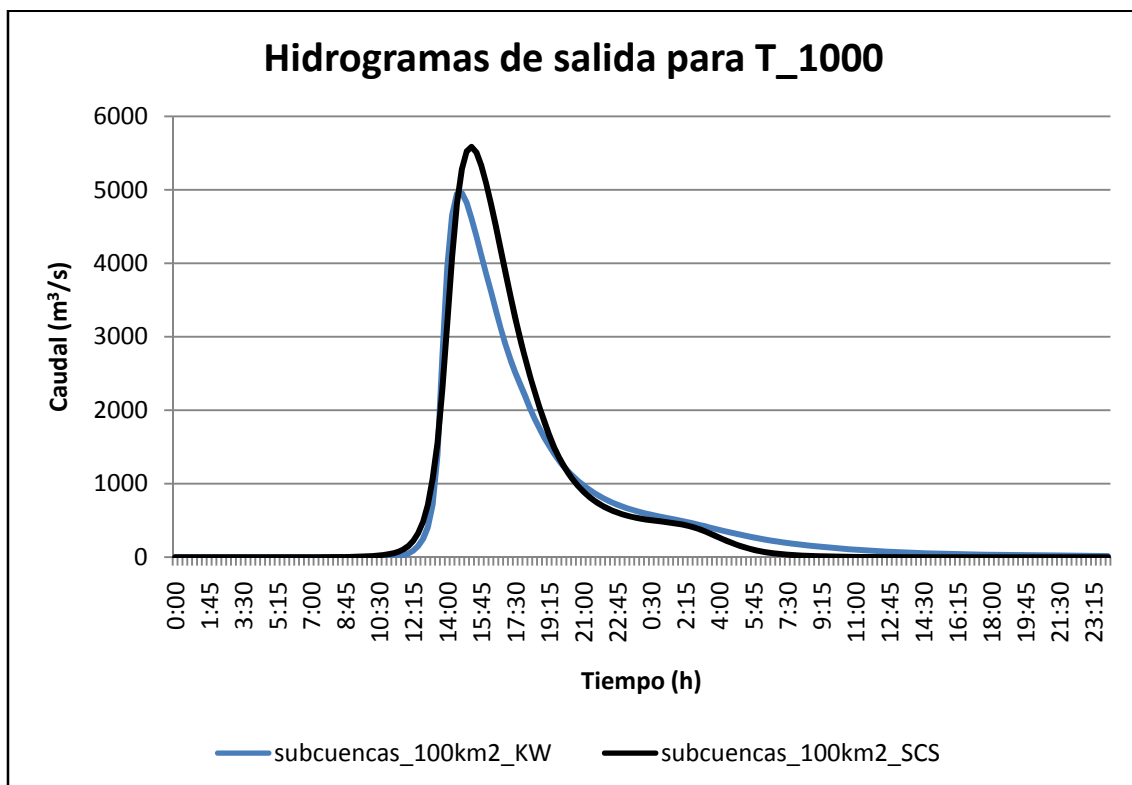


Fig. 8.28. Hidrogramas de salida de la cuenca completa obtenidos con los métodos de KW y SCS para las subcuencas mayores de 100 km^2 y para el periodo de retorno de 1000 años

Para los tamaños de las subcuencas más grandes los datos entre ambos métodos son muy diferentes a los obtenidos con el tamaño de subcuencas más pequeñas. En este caso, para todos los periodos de retorno se observan caudales pico mayores para el método del SCS, sin embargo, para todos los periodos de retorno, el hidrograma correspondiente al método de la Onda Cinemática adelanta su pico con respecto al otro método.

Con respecto a la propagación de la avenida se puede decir que, para periodos de retorno bajos, se produce una laminación artificial, cosa que no ocurre para periodos de retorno más altos. Esto se debe a que, el método de la Onda Cinemática es muy sensible con respecto al valor del coeficiente de rugosidad "N" para pequeños caudales. Sin embargo, para caudales mayores la laminación deja de ser artificial, consiguiendo resultados precisos.

Para conseguir una mayor claridad de los resultados, se muestran las siguientes tablas comparativas.

Caudal pico del hidrograma (m ³ /s)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	907,1	1414	2663,4	3224	3788,2	4552,6	5019,2
KW	422,7	805,3	1963,5	2607	3268,3	4287,1	4954,6
Diferencia	484,4	608,7	699,9	617	519,9	265,5	64,6
%	53,40	40,04	26,28	19,13	13,72	5,83	1,28

Tabla 8.10. Diferencia de caudales picos para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Volumen del hidrograma (mm)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	28,55	43,48	80,04	96,49	113,27	135,84	150,27
KW	27,04	41,35	76,54	92,62	108,96	131,22	144,9
Diferencia	1,51	2,13	3,5	3,87	4,31	4,62	5,37
%	5,28	4,89	4,37	4,01	3,80	3,40	3,57

Tabla 8.11. Diferencia de volúmenes para los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Tiempo pico del hidrograma (minutos)							
> 100 km ²	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500	T 1000
SCS	16:45	16:30	16:00	16:00	16:00	15:45	15:45
KW	19:00	17:15	15:45	15:15	15:00	14:45	14:45
Diferencia	135	45	-15	-45	-60	-60	-60

Tabla 8.12. Tiempo de retardo entre los hidrogramas producidos con el método de la Onda Cinemática y el método del SCS para las subcuencas mayores de 100 km²

Después de observar estos datos se puede decir que:

- Como se comentó anteriormente, los caudales pico del método del SCS son superiores que los caudales pico registrados con el método de la Onda Cinemática. A menor periodo de retorno, mayor diferencia entre los caudales pico de ambos métodos.
- Al igual que pasaba para las subcuencas menores de 50 km², los volúmenes registrados en las subcuencas mayores de 100 km² son muy similares variando en un 4% aproximadamente, según el periodo de retorno. El método que registra los valores mayores es el método del SCS.
- Con respecto a los tiempos pico, para periodos de retorno pequeños el método del SCS se adelanta con respecto al hidrograma generado por el método de la Onda Cinemática. Para periodos de retorno mayores ocurre lo contrario.

Después de todo este análisis entre los tamaños de cuenca y los diferentes métodos de cálculo utilizados se observa claramente que los resultados obtenidos utilizando las subcuencas mayores de 100 km² no son tan fiables como los obtenidos para las subcuencas más pequeñas. El ejemplo más claro se aprecia en la comparación entre los dos métodos de cálculo para el tamaño de las subcuencas más grandes donde los resultados obtenidos no se ajustan a los resultados observados en análisis anteriores.

8. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en el trabajo con SIG son:

- Para trabajar con un programa de sistemas de información geográfica se requiere de cierta experiencia en el manejo del mismo. Por el contrario, HEC-GeoHMS es un programa muy sencillo, creado como un conjunto de herramientas para ingenieros e hidrólogos con limitada experiencia en SIG. Sin embargo, durante el procesado de la cuenca se ha podido comprobar el gran número de inconvenientes que conlleva este proceso, sobre todo cuando se trabaja con cuencas de gran tamaño. Un ejemplo reside en que este programa dispone de un número máximo de obtención de cauces, que, superado ese número es imposible llevar a cabo el proceso.
- Los Sistemas de Información Geográfica han agilizado en gran medida el proceso de la modelización hidrológica.

En relación a los análisis de datos de precipitación llevados a cabo durante este estudio se concluye que:

- Para el análisis de los datos pluviométricos se ha observado que los dos métodos analizados (método de Gumbel y método de la Instrucción de Máximas Lluvias en la España Peninsular) dan resultados muy próximos, siendo los más fiables los obtenidos mediante a función de distribución de Gumbel, ya que con este método se obtienen datos de precipitaciones máximas diarias más elevados, lo que hace que estos datos estén del lado de la seguridad en el caso de una avenida.
- En la aplicación de la Instrucción 5.2-IC hay que tener en cuenta que el valor de corrección del umbral de escorrentía P_0 indicado para esta zona es muy elevado, por lo que se recomienda el uso de un valor inferior, próximo a 1,5 en lugar de 3.
- Sería recomendable que se dispusiera de datos de aforos con el fin de poder calibrar tanto el modelo de cuenca como el modelo meteorológico.. También se podrían calibrar otros valores, estimados de acuerdo a tablas, tales como el número el curva, la rugosidad para la onda cinemática y el patrón de precipitación.

Respecto al análisis de sensibilidad del tamaño de cuencas se concluye que:

- En la aplicación del método del SCS se observa una clara diferencia entre los valores obtenidos para el tamaño de subcuencas menores de 50 km² y los valores de las subcuencas mayores. Es aconsejable dividir la cuenca en tamaños de subcuencas pequeños, menores de 50 km² con el fin de obtener resultados fiables.
- En el método de la Onda Cinemática los resultados obtenidos con las subcuencas menores de 50 km² vuelven a ser más satisfactorios que los obtenidos con el tamaño de subcuencas más grandes.

Respecto al análisis de sensibilidad del método de transformación lluvia-caudal se concluye que:

- De la comparación entre los dos métodos (Hidrograma Unitario del SCS y Onda Cinemática) es clara la influencia del tamaño de la subdivisión de la cuenca completa en los resultados. Para tamaños de subcuencas menores de 50 km² se ha observado cierta similitud entre los resultados de ambos métodos. Sin embargo, para las subcuencas mayores de 100 km² las diferencias aumentan.
- Por otro lado, el método de la Onda Cinemática es más apropiado para esta zona ya que funciona mejor en zonas con poca pendiente, como es el caso de la cuenca de la Rambla del Albuñón. Sin embargo, para aplicarlo y que los resultados sean satisfactorios se requiere tener bien caracterizada la zona de estudio, tanto desde el punto de vista cartográfico, como del punto de vista de uso del suelo (teniendo una información de usos de suelo actualizada) con el fin de poder evaluar apropiadamente el coeficiente de rugosidad "N" y el porcentaje de terreno permeable e impermeable. Con este análisis se ha demostrado la sensibilidad de este método según el valor del coeficiente de rugosidad "N" adoptado. Para pequeños caudales se produce una propagación deficiente de la avenida o laminación artificial, sin embargo para caudales mayores esta propagación artificial de la avenida no se produce.

Como posibles mejoras y estudios posteriores a este proyecto se propone:

- Dividir la cuenca en tamaños de subcuencas más pequeñas que los analizados en este estudio con el fin de comprobar si los datos obtenidos son de mayor exactitud. Con esto se conocería con mayor precisión la importancia del tamaño de las subcuencas en los análisis hidrológicos.

- Con los datos de caudales obtenidos con estas simulaciones se podría realizar un análisis hidráulico de la zona para obtener las zonas de inundabilidad que rodean la Rambla del Albujón.
- Realizar un análisis de sensibilidad del coeficiente de rugosidad “N” y del porcentaje de terreno permeable e impermeable tomado en cada cuenca, empleando la capa de usos del suelo y tipo de suelo, actualizándolo con ayuda de ortofotos o fotografía aérea.

9. Bibliografía

- CASTILLO, L. G. (2002) "Apuntes de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos". Universidad Politécnica de Cartagena.
- FELICÍSIMO, A. (1994). "Modelos Digitales del Terreno". www.etsimo.uniovi.com
- HEC-GeoHMS (2003). "User`s Manual". U.S. Army Corps of Engineers.
- HEC-HMS. (2009) "HEC-HMS User`s Manual". U.S. Army Corps of Engineers.
- Linsley , Kohler, Paulhus.(1977) "Hidrología para ingenieros".
- López Miñano, Inmaculada. (2006) "Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca Mediterránea". Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Martínez Marín, E. (1994). "Hidrología". Ed. Grupo editorial Universitario de Madrid. Segunda edición.
- Martínez García, Pedro. (2007) "Metodología para el estudio de avenidas en ramblas de cuencas mediterráneas utilizando Sistemas de Información Geográfica y modelos semidistribuidos". Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Cartagena.
- MINISTERIO DE FOMENTO (1990). "Instrucción 5.2-IC. Drenaje superficial".
- MINISTERIO DE FOMENTO (2004). "Actualización de la base de datos Corine Land Cover Proyecto I&CLC2000".
- Nanía L. y Gómez Valentín, M. "Ingeniería hidrológica" Ed. Grupo Editorial Universitario de Granada.
- VEN TE CHOW (1988). "Applied Hydrology". Ed. McGraw-Hill.